



**ACTA DE EVALUACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL**  
(FOR EVALUATION OF THE ACT DOCTORAL THESIS)

Año académico (academic year): 2016/17

DOCTORANDO (candidate PHD): **RODRÍGUEZ NAVARRO, DAVID**

PROGRAMA DE DOCTORADO (Academic Committee of the Programme): **D332 DOCTORADO EN ELECTRÓNICA:SISTEMAS ELECTRÓNICOS AVANZADOS.SISTEMAS INTELIGEN**

DEPARTAMENTO DE (Department): **ELECTRÓNICA**

TITULACIÓN DE DOCTOR EN (Phd title): **DOCTOR/A POR LA UNIVERSIDAD DE ALCALÁ**

En el día de hoy 30/03/17, reunido el tribunal de evaluación, constituido por los miembros que suscriben el presente Acta, el aspirante defendió su Tesis Doctoral **con Mención Internacional** (In today assessment met the court, consisting of the members who signed this Act, the candidate defended his doctoral thesis with mention as International Doctorate), elaborada bajo la dirección de (prepared under the direction of) JOSE LUIS LÁZARO GALILEA // IGNACIO BRAVO MUÑOZ.

Sobre el siguiente tema (Title of the doctoral thesis): **SISTEMA DE POSICIONAMIENTO LOCAL EN INTERIORES BASADO EN PSD**

Finalizada la defensa y discusión de la tesis, el tribunal acordó otorgar la CALIFICACIÓN GLOBAL<sup>4</sup> de (no apto, aprobado, notable y sobresaliente) (After the defense and defense of the thesis, the court agreed to grant the GLOBAL RATING (fail, pass, good and excellent): **SOBRESALIENTE / EXCELLENT**

Alcalá de Henares, a 30 de MARZO de 2017

Fdo. (Signed): Alfredo GARDER

Fdo. (Signed): David Salido

Fdo. (Signed): ANTONIO PÉREZ

FIRMA DEL ALUMNO (candidate's signature),

Fdo. (Signed): .....

Con fecha 5 de abril de 2017 la Comisión Delegada de la Comisión de Estudios Oficiales de Posgrado, a la vista de los votos emitidos de manera anónima por el tribunal que ha juzgado la tesis, resuelve:

- ☐ Conceder la Mención de "Cum Laude"  
☒ No conceder la Mención de "Cum Laude"

La Secretaria de la Comisión Delegada

<sup>4</sup> La calificación podrá ser "no apto" "aprobado" "notable" y "sobresaliente". El tribunal podrá otorgar la mención de "cum laude" si la calificación global es de sobresaliente y se emite en tal sentido el voto secreto positivo por unanimidad. (The grade may be "fail" "pass" "good" or "excellent". The panel may confer the distinction of "cum laude" if the overall grade is "Excellent" and has been awarded unanimously as such after secret voting.).

INCIDENCIAS / OBSERVACIONES:  
(Incidents / Comments)

El presente informe tiene como objetivo  
informar a la Gerencia General de la  
Comisión de Vigilancia y Control de la  
Administración Pública (CIVAP) sobre  
los resultados de la auditoría realizada  
a la Gerencia General de la  
Comisión de Vigilancia y Control de la  
Administración Pública (CIVAP) en el  
año 2019.



Universidad  
de Alcalá

COMISIÓN DE ESTUDIOS OFICIALES  
DE POSGRADO Y DOCTORADO

En aplicación del art. 14.7 del RD. 99/2011 y el art. 14 del Reglamento de Elaboración, Autorización y Defensa de la Tesis Doctoral, la Comisión Delegada de la Comisión de Estudios Oficiales de Posgrado y Doctorado, en sesión pública de fecha 5 de abril, procedió al escrutinio de los votos emitidos por los miembros del tribunal de la tesis defendida por *RODRÍGUEZ NAVARRO, DAVID*, el día 30 de marzo de 2017, titulada *SISTEMA DE POSICIONAMIENTO LOCAL EN INTERIORES BASADO EN PSD*, para determinar si a la misma se le concede la mención "cum laude", arrojando como resultado, 2 votos a favor y 1 en contra.

Por lo tanto, la Comisión de Estudios Oficiales de Posgrado **resuelve no otorgar la Mención de "cum laude"** a dicha Tesis.

Alcalá de Henares, 7 de abril de 2017  
EL PRESIDENTE DE LA COMISIÓN DE ESTUDIOS  
OFICIALES DE POSGRADO Y DOCTORADO



Juan Ramón Velasco Pérez

**Copia por e-mail a:**

Doctorando: RODRÍGUEZ NAVARRO, DAVID

Secretario del Tribunal: DAVID SALIDO MONZÚ.

Directores de Tesis: JOSE LUIS LÁZARO GALILEA//IGNACIO BRAVO MUÑOZ

# UNIVERSIDAD DE ALCALÁ

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA



**Tesis Doctoral**

**Sistema de Posicionamiento Local  
en Interiores basado en PSD**

David Rodríguez Navarro

2017







Universidad  
de Alcalá

Programa de Doctorado en Electrónica: Sistemas  
Electrónicos Avanzados. Sistemas Inteligentes

## **Sistema de Posicionamiento Local en Interiores basado en PSD**

Tesis Doctoral presentada por  
**David Rodríguez Navarro**

Directores

**Dr. José Luis Lázaró Galilea**

**Dr. Ignacio Bravo Muñoz**

Alcalá de Henares, Marzo de 2017





Universidad  
de Alcalá

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA  
Campus Universitario s/n  
28805 Alcalá de Henares (Madrid)  
Teléfonos: 91 885 65 40  
Fax: 91 885 65 91

Dr. D. José Luis Lázaro Galilea, Catedrático de la Universidad de Alcalá y  
Dr. D. Ignacio Bravo Muñoz, Profesor Titular de la Universidad de Alcalá.

INFORMAN: Que la Tesis Doctoral titulada **“Sistema de Posicionamiento Local en Interiores Basado en PSD”** presentada por **D. David Rodríguez Navarro** y realizada bajo nuestra dirección, reúne los méritos de calidad y originalidad para optar al Grado de Doctor.

En Alcalá de Henares, a 7de febrero de 2017

Fdo: José Luis Lázaro Galilea

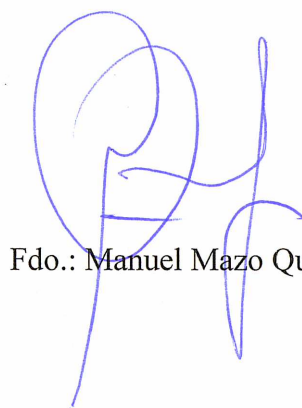
Fdo: Ignacio Bravo Muñoz



Dr. D. Manuel Mazo Quintas, Coordinador del Programa de Doctorado “Electrónica: Sistemas Electrónicos Avanzados. Sistemas Inteligentes”.

INFORMA: Que la Tesis Doctoral titulada “**Sistema de Posicionamiento Local en Interiores Basado en PSD**” presentada por **D. David Rodríguez Navarro** y realizada bajo la dirección de los doctores D. José Luis Lázaro Galilea y D. Ignacio Bravo Muñoz, cumple con todos los requisitos científicos y metodológicos para ser defendida ante un tribunal para optar al Grado de Doctor, según lo indicado por la Comisión Académica del Programa de Doctorado.

Alcalá de Henares, a 7 de febrero de 2017



Fdo.: Manuel Mazo Quintas





# Resumen

La tesis está orientada al desarrollo de un sistema sensorial para localización y posicionamiento basado en IR, utilizando un detector óptico PSD. La localización y posicionamiento del agente que emite la señal de IR se determinan mediante la obtención del ángulo de incidencia (AoA) y la distancia al agente.

El trabajo presenta una descripción de la propuesta de desarrollo del LPS basado en PSD y de las restricciones y condicionantes tecnológicas existentes. Se analizan los aspectos más relevantes que pueden afectar al desarrollo, precisión y rendimiento del sistema propuesto; en concreto se estudian pormenorizadamente dos aspectos que van a ser determinantes en la tesis y que están relacionadas con los errores que introducen los desbalances de los diferentes canales y con los efectos de distorsión del propio PSD y de los sistemas ópticos.

En relación con los efectos eléctricos y sus errores asociados se propone un modelo del sistema y un procedimiento y metodología para la calibración. La comprobación de la propuesta y de los resultados esperados se realiza primero mediante emulaciones y posteriormente mediante pruebas empíricas. Relacionado con los efectos de distorsiones se propone un modelo geométrico del comportamiento del sensor PSD y su sistema óptico acoplado, basado inicialmente en el modelo de pin-hole para, posteriormente, ir completando con los efectos de errores y no linealidades que afectan al conjunto. Se propone un sistema matemático completo para el modelo y para la calibración de los parámetros del mismo.

Una vez modelado todo el sistema se desarrollan propuestas para la determinación de la posición 3-D. Estas tienen en cuenta que los robots móviles se van a mover en un plano, la potencia que se recibiría en función de la posición de los agentes, la posibilidad de disponer de recepción estéreo, etc. También se introduce un método para la determinación 3-D a partir de la potencia y desfase de la señal recibida.

Finalmente, se desarrollan pruebas experimentales para validar empíricamente todas las hipótesis y contribuciones, que demuestran que el sistema es muy estable en las medidas realizadas y con una muy alta precisión, siendo los errores cometidos en el posicionamiento de pocos centímetros, e incluso de milímetros con algunas de las técnicas propuestas. Además, se presentan las conclusiones obtenidas de esta investigación y las perspectivas futuras que en esta y otras líneas se podrán abordar a partir

de los trabajos aquí realizados.

**Palabras clave:** Modelos eléctricos, modelos geométricos, LPS, Sensor PSD, Infrarrojos, posicionamiento 3-D, AoA, RSS, PDoA.

# Abstract

This dissertation is oriented to the development of a sensorial system for localization and positioning based on infrared (IR) using a PSD optical detector. The agent will be in charge of the light emission and the position and localization of it will be obtained by the angle of incidence (AoA) and the distance to the agent.

This work shows a novel approach for the development of a local position system (LPS) based on PSD devices. The more relevant features what can affect to the development, accuracy and performance of the proposed system are considered in this work. In particular, two main aspects are analysed in detail because they are related with the errors from imbalanced effects in the different channels and the effects of distortion of the own PSD and optical systems.

Concerning to those electric effects and their related errors, a new model of the system is proposed and a procedure and methodology for the calibration. These ones have been validated first by emulations and subsequently by empirical evidences. Regarding the distortion effects, a geometrical model of the PSD behaviour including its optical system has been proposed. A pin-hole model was initially used and error effects and nonlinearities were added later. A complete mathematical system for the model and calibration of the parameters is proposed as a relevant contribution.

When a complete system model is obtained, approaches for obtaining 3-D position are developed. These take into account mobile robots are moving on a plane, the received power based on the agent positions, the possibility of having stereo reception, etc. It also introduces a method for determining 3-D from the power and phase difference of the received signal.

Finally, experimental tests are developed to empirically validate all assumptions and contributions, showing that the system is very stable in the measures carried out and with a very high accuracy. Errors of few centimetres and even mm with some of the proposed techniques, are obtained. In addition, the main achieved conclusions from this research and future perspectives beyond this work are addressed.

**Keywords:** electrical models, geometrical models, LPS, PSD Sensor, infrared, 3-D positioning, AoA, RSS, PDoA.



# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>ix</b>
<b>Abstract</b>	<b>xi</b>
<b>Índice general</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>xvii</b>
<b>Lista de acrónimos</b>	<b>xvii</b>
<b>Lista de símbolos</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Contexto de la Tesis . . . . .	3
1.2 Motivación y objetivos de la tesis . . . . .	4
1.3 Estructura de la tesis . . . . .	5
<b>2 Estado del Arte</b>	<b>7</b>
2.1 Sistemas de posicionamiento en interiores . . . . .	7
2.2 Aplicaciones . . . . .	8
2.3 Tecnologías de posicionamiento . . . . .	10
2.3.1 Visión . . . . .	11
2.3.2 Ultrasonidos (US) . . . . .	15
2.3.3 Redes inalámbricas de ámbito local (WLAN) . . . . .	16
2.4 Infrarrojos . . . . .	19
2.5 Técnicas de posicionamiento . . . . .	20
2.5.1 Estrategias para la determinación de la posición del agente móvil	20

2.6	Sensores PSD (Position Sensitive Dectector) . . . . .	22
2.7	Métodos de calibración para cámaras . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Descripción y condicionantes de la propuesta.</b>	<b>29</b>
3.1	Descripción del LPS . . . . .	29
3.1.1	Receptor . . . . .	30
3.1.2	Emisor IR . . . . .	35
3.1.3	Sistemas con identificación multiagente . . . . .	36
3.1.4	Consideraciones a tener en cuenta en la elección de la lente y su acoplamiento al PSD . . . . .	36
3.2	Problemas eléctricos debidos al sensor PSD y el circuito acondicionador de señal . . . . .	37
3.2.1	Desequilibrios en los factores de ganancia debidos a las toleran- cias y temperatura . . . . .	37
3.2.2	Ruido eléctrico en las señales a la salida del sensor PSD . . . . .	39
3.2.3	Ruido de cuantificación . . . . .	40
3.2.4	Efectos no ideales de los amplificadores operacionales . . . . .	42
3.3	Problemas y restricciones debidos del sistema óptico . . . . .	43
3.4	Propuestas para la determinación de la posición 3D . . . . .	44
3.4.1	Obtención del plano por el que se mueve el agente móvil . . . . .	45
3.4.2	Determinación de la posición 3D por medio de RSS y marcas . . . . .	46
3.4.3	Determinación de la posición 3D por medio de RSS y recepción estéreo . . . . .	47
3.4.4	Determinación de la posición 3D por medio de RSS y PDoA . . . . .	48
3.5	Resumen y conclusiones . . . . .	49
<b>4</b>	<b>Calibración Eléctrica</b>	<b>53</b>
4.1	Análisis de las fuentes de error . . . . .	53
4.1.1	Efecto de las tolerancias de los componentes del circuito eléctrico . . . . .	53
4.1.2	Efecto de la temperatura en los componentes eléctricos . . . . .	56
4.1.3	Efecto del SNR en el cálculo del punto de impacto . . . . .	58
4.1.4	Análisis del efecto de la cuantificación . . . . .	60
4.1.5	Conclusiones de las simulaciones . . . . .	63
4.2	Método de calibración . . . . .	63

4.3	Pruebas experimentales . . . . .	65
4.3.1	Calibración de la ganancia de los diferentes canales . . . . .	66
4.3.2	Evaluación de la influencia del SNR del sistema . . . . .	69
4.3.3	Evaluación de la influencia del SNR de cuantificación . . . . .	71
4.4	Conclusiones y futuros trabajos . . . . .	72
<b>5</b>	<b>Calibración geométrica</b>	<b>75</b>
5.1	Modelado del sistema óptico . . . . .	75
5.2	Proceso de calibración . . . . .	78
5.2.1	Método de calibración . . . . .	79
5.2.2	Corrección preliminar de la distorsión . . . . .	82
5.2.3	Normalización de datos . . . . .	83
5.2.4	Análisis del error . . . . .	84
5.3	Evaluación del método de calibración propuesto . . . . .	85
5.3.1	Evaluación de las correcciones preliminares . . . . .	87
5.3.2	Evaluación del efecto del ruido de las señales del sensor PSD en el proceso de calibración . . . . .	88
5.3.3	Evaluación del efecto de los desequilibrios en los factores de ganancia en la calibración . . . . .	90
5.3.4	Análisis de la distorsión del sensor PSD en el método de calibración	92
5.3.5	Conclusiones de las simulaciones . . . . .	94
5.4	Pruebas experimentales . . . . .	96
5.5	Conclusiones . . . . .	101
<b>6</b>	<b>Propuestas para la determinación de la posición 3D con PSDs.</b>	<b>103</b>
6.1	Obtención de la posición 3-D con un solo PSD a partir del plano de movimiento del agente . . . . .	104
6.2	Determinación de la posición 3D por medio de RSS y marcas . . . . .	109
6.3	Determinación de la posición 3D por medio de RSS y recepción estéreo .	114
6.4	Determinación de la posición 3D por medio de RSS y PDoA . . . . .	118
6.4.1	Demodulador I/Q . . . . .	118
6.4.2	Early-late Delay-Locked Loop . . . . .	120
6.4.3	Efecto del ruido en las señales . . . . .	124
6.4.4	Análisis de los osciladores . . . . .	125
6.5	Conclusiones . . . . .	127



<b>7</b>	<b>Pruebas experimentales y resultados</b>	<b>129</b>
7.1	Set-up para la realización de las pruebas . . . . .	129
7.2	Detección e identificación de múltiples agentes . . . . .	133
7.3	Posicionamiento 3-D a partir de la calibración del plano de movimiento	135
7.4	Posicionamiento 3-D a partir de RSS y marcas . . . . .	143
7.5	Posicionamiento 3-D a partir de recepción estéreo . . . . .	147
7.6	Conclusiones . . . . .	153
<b>8</b>	<b>Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>155</b>
8.1	Conclusiones . . . . .	155
8.2	Trabajos futuros . . . . .	159
8.3	Publicaciones . . . . .	160
	<b>Bibliografía</b>	<b>161</b>

# Índice de figuras

2.1	Robot autónomo para mapeado de entornos [Trulls et al., 2011] . . . . .	10
2.2	Tecnologías de LPS ordenadas por precisión y área de cobertura. [Mautz, 2012] . . . . .	11
2.3	Comparación de imágenes captadas con las existentes en la base de datos, [Kim and Jun, 2008] . . . . .	12
2.4	Marcas artificiales para determinar posición 3-D e identificación de robots móviles, (a) Marca utilizada en [Rostkowska and Topolski, 2015]; (b) Vista general del entorno [Rostkowska and Topolski, 2015] . . . . .	13
2.5	LPS basado en visión y marcas artificiales utilizando LEDs IR [Hijikata et al., 2009] . . . . .	13
2.6	Marcas artificiales para determinar posición 3-D e identificar de robots móviles; (a) Marca utilizada en [Fan et al., 2008]; (b) Marca utilizada en [Fernández et al., 2007] . . . . .	14
2.7	Receptor utilizado en el proyecto cricket [Priyantha et al., 2000] . . . . .	15
2.8	Estrategia de posicionamiento Cell-ID; figura obtenida del capítulo 2 del libro Wi-Fi location-Based Services 4.1 Design Guide . . . . .	17
2.9	Ejemplo de un LPS basado en WLAN y Fingerprinting. Imagen extraída de <a href="http://www.cogapp.com/blog/indoor-positioning">http://www.cogapp.com/blog/indoor-positioning</a> . . . . .	18
2.10	Tarjeta electrónica con LEDs IR utilizada en [Aitenbichler and Mühlhäuser, 2003] . . . . .	19
2.11	Representación gráfica de la trilateración esférica . . . . .	21
2.12	representación gráfica de la multilateración . . . . .	22
2.13	Esquema de posicionamiento basado en AoA a dos sensores (posicionamiento estéreo) . . . . .	22
2.14	Tipos de sensores PSD bidimensionales y circuitos equivalentes; (a) dualateral; (b) Tetra-lateral; (c) Pin-cushion; imágenes extraídas de [Hammatsu, ] . . . . .	23

2.15 Representación de la distorsión de tipo cojín del sensor PSD, [Luo et al., 2013] . . . . .	24
2.16 Corrección de la distorsión del sensor PSD, [Luo et al., 2013]; (a) Corrección de puntos formando una “espiral” cuadrada; (b) Corrección de puntos formando círculos . . . . .	25
2.17 Plantilla 3D para calibración de cámaras utilizada en [Ha, 2009] . . . . .	26
2.18 Set de imágenes para calibración de cámara utilizadas en [Zhang, 2000] . . . . .	27
3.1 Sistema LPS propuesto . . . . .	30
3.2 Sección de un sensor PSD Unidimensional. Figura cortesía de Hamamatsu . . . . .	31
3.3 Circuito equivalente del sensor PSD pin-cushion. Figura cortesía de Hamamatsu . . . . .	31
3.4 Respuesta espectral de sensores de Hamamatsu . . . . .	32
3.5 Tensión de polarización <i>vs</i> (a) Capacidad interna; (b) Corriente de oscuridad . . . . .	33
3.6 Campo de visión en función del tamaño del sensor PSD y de la distancia focal . . . . .	34
3.7 Refracción <i>vs</i> longitud de onda. Imagen obtenida de la web de Thorlabs . . . . .	34
3.8 Patrón de emisión de dos IRED; (a) Con ángulo mitad $\pm 60^\circ$ ; (b) Con ángulo mitad $\pm 45^\circ$ . . . . .	35
3.9 FoV del receptor <i>vs</i> ángulo mitad del emisor; (a) FoV igual al ángulo mitad; (b) FoV mayor que el ángulo mitad; (c) FoV menor que el ángulo mitad. . . . .	36
3.10 Representación de un receptor y un emisor con diferentes orientaciones . . . . .	37
3.11 Circuito acondicionador de señal y circuito de polarización para un PSD . . . . .	38
3.12 Circuito eléctrico equivalente para un canal del PSD . . . . .	39
3.13 SNR de cuantificación en relación al número de bits del ADC con $V_{pp} = \text{SPAN}$ ; (a) $f_s = 2\text{BW}$ ; (b) $f_s = 20\text{BW}$ . . . . .	41
3.14 Esquema representativo del sistema óptico . . . . .	43
3.15 Distorsión radial; (a) tipo cojín; (b) tipo barril . . . . .	44
3.16 Representación gráfica del procedimiento de calibración del plano . . . . .	45
3.17 Parámetros geométricos que intervienen en la emisión y recepción de luz . . . . .	46
3.18 Escenario donde hay zonas cubiertas por dos sensores PSD y zonas cubiertas por un solo sensor PSD . . . . .	47
3.19 Determinación de la distancia entre emisor y receptor . . . . .	48

4.1	Variación del factor de ganancia de un canal del sensor PSD con respecto a la frecuencia de trabajo, siendo $R_f=50\text{ k}\Omega$ y $C_f=33\text{ pF}$ . . . . .	54
4.2	Error en el punto de impacto debido a diferencias en los factores de ganancia . . . . .	55
4.3	Error en el punto de impacto debido a diferencias en los factores de ganancia; (a) Punto central ampliado; (b) Histograma del punto central . . . . .	56
4.4	Error en el cálculo del punto de impacto en el centro del sensor PSD debido a $5^\circ\text{C}$ de diferencia en la temperatura entre canales . . . . .	57
4.5	Ruido del sistema; (a) Densidad espectral de ruido; (b) Ruido total a la salida . . . . .	58
4.6	Error en el cálculo del punto de impacto en función del SNR . . . . .	59
4.7	Ampliación del error en el cálculo del punto de impacto de la coordenada (5,-5) . . . . .	60
4.8	Error en el cálculo del punto de impacto debido al ruido del sistema ( $\text{SNR}=20\text{ dB}$ ) y al $\text{SNR}_Q$ . . . . .	61
4.9	Error en el cálculo del punto de impacto debido al ruido del sistema ( $\text{SNR}=20\text{ dB}$ ) y del $\text{SNR}_Q$ ; (a) Coordenada (0,0); (b) Coordenada (5,0); (c) Coordenada (0,-5); (d) Coordenada (5,-5) . . . . .	62
4.10	Representación del ángulo sólido con iluminación homogénea . . . . .	64
4.11	Soporte automatizado para pruebas . . . . .	66
4.12	Prueba para constatar que la iluminación es homogénea; (a) Desplazamiento del emisor; (b) Diferencias de voltajes entre la señal 1 y las señales 2, 3 y 4 . . . . .	67
4.13	Relación de ganancia entre canales en función de la frecuencia . . . . .	68
4.14	Diferencias obtenidas entre puntos medidos y puntos corregidos . . . . .	69
4.15	Densidad espectral de ruido del sistema (canal 1) . . . . .	70
4.16	Error del cálculo del punto de impacto con diferentes valores de SNR . . . . .	71
4.17	Error en el cálculo en el punto de impacto con SNR de 20 dB y 6 bits de resolución . . . . .	72
5.1	Representación del modelo Pin-Hole . . . . .	75
5.2	Formación de la imagen de la plantilla de calibración; (a) Coordenadas de la plantilla de calibración; (b) Imagen distorsionada en el plano del sensor . . . . .	82
5.3	Sensibilidad en el cálculo del ángulo de incidencia debido a, (a) Error en el punto de impacto; (b) Error en la focal . . . . .	85

5.4	Plantilla sintética de calibración 2D para simulaciones . . . . .	86
5.5	Imágenes para calibración; (a) Set de imágenes de la lente 1; (b) Set de imágenes de la lente 2 . . . . .	86
5.6	Plantilla de calibración, generador de señales y fuente alimentación. . .	96
5.7	Soporte de pruebas automatizado con 5 grados de libertad . . . . .	97
5.8	Set de imágenes para la lente ACL25416U-B. . . . .	97
5.9	Corrección distorsión de la lente ACL25416U-B . . . . .	98
5.10	Set de imágenes para la lente JF7.5M-2 . . . . .	99
5.11	Corrección de la distorsión de la lente JF7.5M-2 . . . . .	100
6.1	Determinación del plano $\pi$ por medio de una plantilla de calibración de 5 puntos . . . . .	104
6.2	Sensibilidad en el cálculo de Z respecto a los parámetros que modelan el plano $\pi$ . . . . .	106
6.3	Sensibilidad en el cálculo de la coordenada X debido variaciones en la coordenada en la coordenada Z. . . . .	107
6.4	Sensibilidad de la coordenada Z respecto a los ángulos de incidencia. . .	108
6.5	Sensibilidad en la coordenada X; (a) Respecto al ángulo de incidencia para Z igual a 2500 mm y 4000 mm; (b) Respecto al error en la coordenada Z. . . . .	109
6.6	Esquema del movimiento del sensor para el modelado de la lente. . . . .	110
6.7	Sensibilidad de la distancia en función del ángulo de incidencia, para errores de 0.1 y 0.5 en el ángulo de incidencia, y distancias de 2.5 y 4 m. . . . .	112
6.8	Error en el cálculo de la distancia debido al error de ángulo de emisión, para una profundidad de 4 metros. . . . .	113
6.9	Sensibilidad en el cálculo de la distancia a 2 y 4 metros y variaciones de potencia de 1 y 10 mW. . . . .	114
6.10	Esquema ilustrativo de la calibración estéreo . . . . .	115
6.11	Cruce de las rectas para determinar las coordenadas 3-D . . . . .	116
6.12	Diagrama de un demodulador I/Q . . . . .	118
6.13	Demodulación I/Q; (a) Señales $I$ , $Q$ , $I_F$ y $Q_F$ ; (b) FFT de las señales $I$ e $I_F$ . . . . .	120
6.14	Representación del uso de secuencias moduladas; (a) Secuencia (azul) y secuencia modulada (rojo), siendo de igual frecuencia la señal portadora y la señal moduladora; (b) FFT de la secuencia y la señal modulada . . . . .	121

6.15	Uso de secuencias moduladas; (a) Secuencia (azul) y secuencia modulada (verde), siendo el doble la frecuencia de la señal moduladora que la portadora ; (b) FFT de la señal modulada . . . . .	121
6.16	Diagrama de un Early-Late DLL . . . . .	122
6.17	Correlación de la señal recibida con las réplicas Early y Late. . . . .	123
6.18	Resta de las correlaciones Early y Late . . . . .	123
6.19	Representación de lo que ocurriría con la señal Early-Late para 2 posiciones diferentes del agente. . . . .	124
6.20	Discriminador DLL; (a) Early-Late con SNR en las señales de 10 dB; (b) Ampliación del cruce por cero . . . . .	125
6.21	Error en el cálculo de la diferencia de distancia debido al jitter. . . . .	126
7.1	Diagrama del sistema . . . . .	129
7.2	Escenario donde se han realizado las pruebas . . . . .	130
7.3	Placa de circuito impreso para sensor PSD; (a) PCB con lente; (b) PCB sin lente . . . . .	131
7.4	Emisor IR SFH-4233 . . . . .	131
7.5	Tarjeta adquisición de datos CS8284 de Gage . . . . .	132
7.6	Instrumentación utilizada; (a) Fuente de alimentación HMP-2020 y generador AFG 3252; (b) Ordenador con tarjeta de adquisición de datos CS8284 y fuente de alimentación HMP-4040. . . . .	132
7.7	Prueba para la detección de múltiples agentes; (a) Señales de salida del sensor PSD emitiendo simultáneamente con tres emisores a diferentes frecuencias; (b) FFT de la señal $S_1$ . . . . .	133
7.8	Prueba para la detección de múltiples agentes; (a) Señales filtradas de la salida del electrodo 1; (b) Punto de impacto sobre la superficie del sensor PSD de la señal de cada uno de los emisores . . . . .	134
7.9	Puntos proyectados en el entorno suponiendo que el plano es coplanar al receptor . . . . .	135
7.10	Puntos sobre el plano a calibrar captados en el plano imagen del sensor PSD. . . . .	136
7.11	Puntos de la plantilla de calibración proyectados sobre el entorno a partir de sus imagen en el sensor PSD . . . . .	137
7.12	Ilustración de los puntos de la plantilla de la calibración sobre el plano calculado . . . . .	137

7.13	Comparativa de los puntos 3-D utilizados para la determinación del plano y los puntos calculados a partir de la intersección del plano y las rectas formadas por los ángulos de incidencia . . . . .	138
7.14	Puntos en el plano imagen obtenidos de los puntos de una recta en el entorno. . . . .	139
7.15	Puntos proyectados sobre el entorno y cortes con el plano que proporcionan las coordenadas 3-D . . . . .	140
7.16	Puntos en el plano imagen de emisiones desde varios puntos de una circunferencia . . . . .	141
7.17	Proyección sobre el entorno de los puntos captados desde diferentes posiciones de la circunferencia. . . . .	142
7.18	Circunferencia obtenida sobre el plano a partir de los AoA calculados. . .	142
7.19	Puntos medidos de una recta en el plano; (a) Vista X-Y; (b) Vista X-Z. . .	143
7.20	Ajuste de los modelos matemáticos de la lente a los puntos medidos . .	144
7.21	Representación de las coordenadas 3D obtenidas de puntos de dos rectas paralelas utilizando diferentes modelos matemáticos para modelar el receptor . . . . .	145
7.22	Representación de las coordenadas 3-D obtenidas mediante AoA y potencia estimada. (a) Vista X-Z; (b) Vista X-Y . . . . .	145
7.23	Errores cometidos en la determinación de los diferentes puntos y coordenadas; (a) Eje X; (b) Eje Y; (c) Eje Z . . . . .	146
7.24	Plantilla utilizada para calibración del sistema estéreo . . . . .	148
7.25	Puntos captados en el plano imagen de la plantilla de calibración; (a) Receptor 1; (b) Receptor 2 . . . . .	148
7.26	Recepción estéreo de la plantilla con referencia en el receptor 1. . . . .	150
7.27	Resultados del posicionamiento 3D mediante recepción estéreo . . . . .	150
7.28	Puntos determinados por medio de recepción estéreo (azul), por medio de los parámetros extrínsecos (verde) y por medio de RSS (rojo). . . . .	152



# Índice de tablas

2.1	Comparativa de los diferentes métodos de calibración, [Isern Gonzalez, 2003] . . . . .	27
4.1	Errores máximos, medios y desviación estándar, debido a diferencias en los factores de ganancias de cada canal, para diferentes tolerancias en los componentes . . . . .	56
4.2	Errores máximos y medios y desviación estándar para diferentes SNR en el punto de impacto (5,-5) . . . . .	60
4.3	Errores máximos y medios y desviación típica en diferentes puntos de impacto, para SNR de 20 dB y 6 bits de conversión . . . . .	62
4.4	Comparación de los errores del SNR simulados con los errores de las pruebas experimentales . . . . .	71
4.5	Errores máximos y medios, y desviación típica en función del número de bits . . . . .	72
5.1	Comparación de los resultados de la 1ª etapa de Zhang, con y sin corrección preliminar de la distorsión y con y sin normalización de datos, para la lente 1. . . . .	87
5.2	Comparación de los resultados de la 1ª etapa de Zhang, con y sin corrección preliminar de la distorsión y con y sin normalización de datos, para la lente 2. . . . .	87
5.3	Resultados de la calibración con diferentes SNR en las señales y con la corrección previa de la distorsión y sin ella para la lente 1 . . . . .	89
5.4	Resultados de la calibración con diferentes SNR en las señales y con la corrección previa de la distorsión y sin ella para la lente 2 . . . . .	89
5.5	Evaluación del método de calibración con desequilibrios en los factores de ganancias y ruidos para la lente 1. . . . .	91
5.6	Evaluación del método de calibración con desequilibrios en los factores de ganancias y ruidos para la lente 2. . . . .	92

5.7	Evaluación del método de calibración ante distorsión en el sensor PSD y en combinación con los desequilibrios en los factores de ganancia y los ruidos para la lente 1 . . . . .	93
5.8	Evaluación del método de calibración ante distorsión en el sensor PSD y en combinación con los desequilibrios en los factores de ganancia y los ruidos para la lente 2. . . . .	94
5.9	Comparación de los resultados para la lente 1. . . . .	95
5.10	Comparación de los resultados de las diferentes pruebas realizadas para la lente 2 . . . . .	95
5.11	Comparativa de los resultados de la calibración geométrica para la lente Thorlabs ACL25416U-B con y sin calibración eléctrica . . . . .	98
5.12	Resultados de la calibración de la lente JF7.5M-2 con diferente número de imágenes . . . . .	100
7.1	Posiciones 3-D de la plantilla para calibración del plano . . . . .	136
7.2	Parámetros de la ecuación del plano . . . . .	137
7.3	Posiciones 3-D de la plantilla para calibración del plano . . . . .	138
7.4	Distancia calculada entre puntos proyectados sobre el plano . . . . .	140
7.5	Distancia calculada entre el punto 3 y los demás puntos . . . . .	140
7.6	RMSE de las funciones utilizadas para modelar el comportamiento de la lente . . . . .	144
7.7	Errores en las coordenadas $X$ , $Y$ , y $Z$ , con los diferentes modelos de lentes	147
7.8	Errores relativos en las coordenadas $X$ , $Y$ y $Z$ , utilizando el polinomio de grado 7 para el modelado de la lente. . . . .	147
7.9	Errores de los puntos calculados por medio de recepción estéreo, siendo los ideales los obtenidos de las matrices de rotación y traslación del receptor de referencia. . . . .	151
7.10	Comparación entre los puntos obtenidos por RSS, estéreo y por medio de la calibración de la plantilla. . . . .	152

# Capítulo 1

## Introducción

El propósito de esta tesis es la realización de un sistema de posicionamiento basado en dispositivos PSD para el desarrollo de un espacio inteligente. Entendiendo como espacio inteligente un entorno como pueda ser un laboratorio, espacio público, etc., que está sensorizado y que comparte información con los diferentes agentes que se encuentran en él, este es capaz de interactuar y cooperar con los agentes móviles (“ocupantes”) que operan dentro del mismo [[Sasaki and Hashimoto, 2007](#)].

En la última década se han realizado investigaciones por un amplio número de grupos en todo el mundo, en sistemas para concebir los espacios inteligentes de manera poco invasiva y cada vez más avanzada. Además, se han realizado múltiples esfuerzos para conseguir sistemas que permitan que los agentes móviles no lleven a bordo equipamientos complejos, voluminosos, de gran capacidad de cómputo y consumo alto. Es decir que sean los sistemas ubicados en el propio espacio quienes determinen la posición absoluta, y si fuese necesario transmitirla al agente móvil, con suficiente precisión, fiabilidad y rapidez.

Los sistemas sensoriales que se están utilizando actualmente en el desarrollo de los sistemas de posicionamiento locales (LPS) se basan en de diferentes tipos de tecnologías y dispositivos, como por ejemplo redes de cámaras, sensores de ultrasonidos, sensores de infrarrojos, micrófonos, pantallas, etc. Estos sistemas suponen un valor añadido al alza motivados por las diversas aplicaciones que tienen, tanto en los sectores: industrial, logístico y de transporte, como en comercios, sistemas de defensa, etc. Uno de los objetivos fundamentales en todas estas áreas es que los agentes móviles (plataformas de reparto, sillas de ruedas, etc.) se desplacen entre diferentes puntos, siguiendo caminos o estrategias previamente definidos sin obstaculizarse entre ellos y percibiendo obstáculos del entorno. Realizarlo implica determinar su posición absoluta y detectar los posibles obstáculos que se puedan presentar en su camino.

En el sector servicios, por ejemplo, el apoyo a la auto-localización y guiado de personas por espacios grandes como aeropuertos, estaciones de tren, centros comerciales sería una aplicación objetiva que motiva el desarrollo de LPS's. En el sector de la salud

el objetivo podría ser localizar e identificar a pacientes o personal sanitario [Calderoni et al., 2015] y en el sector industrial, los LPS están destinados a las “industrias inteligentes” donde los robots móviles necesitan de un sistema de localización para desplazarse por el entorno de forma autónoma [Wiesner et al., 2017].

Como se puede deducir fácilmente de los párrafos anteriores, existen diversas aplicaciones muy útiles y necesarias, y que aportan un gran valor añadido a nuestra sociedad actual, para justificar la investigación y desarrollo de sistemas LPS. Cada una de las aplicaciones tendrán unos condicionantes y restricciones particulares, pero en gran medida el tronco común de las investigaciones será válido para la consecución de las mismas; es por ello que actualmente se están proponiendo y utilizando una gran variedad de tecnologías para el desarrollo y uso de LPSs, basadas en: WLAN, ultrasonidos, UWB, visión artificial, infrarrojos, etc., las cuales tienen diferentes características en cuanto a: cobertura, precisión, coste, escalabilidad, mantenimiento, privacidad, etc.

Por ejemplo, en el caso de diseñar un LPS para el guiado de personas por grandes superficies, la tecnología adecuada a utilizar (pero no única) podría ser WLAN, ya que tiene coberturas de más de 50 metros, con precisiones de 4 o 5 metros [Mautz, 2012] y el coste de la infraestructura suele ser bajo debido a que en muchos lugares ya existen puntos de acceso a WLAN, que se ha desplegado debido al uso abundante y extendido del *smartphone*. En cambio, esta tecnología podría no ser útil en caso de diseñar un LPS orientado a robots autónomos en espacios más reducidos, debido a que podrían requerir de precisiones mayores de las que aporta esa tecnología.

En el caso de esta tesis, el sistema LPS desarrollado se enmarca dentro de los sistemas para la ayuda al posicionamiento de robots móviles, y por tanto la precisión en el posicionamiento es la principal característica a tener en cuenta. Esto hace que se acoten un poco las tecnologías a poder utilizar, considerando, a priori, que serían adecuadas las basadas en visión artificial, sistemas magnéticos, ultrasonidos e infrarrojos. Además, se pretende que el coste del sistema LPS sea reducido, reduciendo también en la medida de lo posible el número de sensores a disponer en el entorno.

Por precisión y cobertura la visión artificial es la que mejores prestaciones está aportando hoy en día, dentro de las establecidas que llevan ya muchos años implantadas. Sin embargo, el coste de las cámaras y el hardware para el procesamiento de las imágenes es, de costes altos, añadiendo además la alta carga computacional, lo que hace que se planteen investigaciones con otras tecnologías que puedan competir en precisión reduciendo enormemente el resto de los aspectos.

Una alternativa que constituiría a priori una solución muy equilibrada de todos los aspectos indicados y que como hipótesis de partida, podría aportar una precisión extraordinaria sería el desarrollo de sistemas sensoriales basados en sensores PSD (Position Sensitive Detector); estos sensores son fotodiodos sensibles al infrarrojo, con la particularidad de que permite calcular el punto de impacto de un haz de luz que incide sobre su superficie [Hamamatsu, ]. Esta característica los haría idóneos para aplicar las

técnicas de determinación de la posición basadas en el ángulo de llegada (AoA).

Por lo anteriormente comentado, se va a plantear en esta tesis la investigación y desarrollo de sistemas de posicionamiento local en interiores basados en dispositivos PSD.

## 1.1 Contexto de la Tesis

Esta tesis se ha desarrollado dentro del Grupo de investigación GEINTRA (Grupo de Ingeniería Electrónica Aplicada a Espacios Inteligentes y Transporte) del Departamento de Electrónica de la Universidad de Alcalá. Las aplicaciones en las que se enmarcan las investigaciones del grupo son los espacios inteligentes y transporte inteligente, siendo las líneas de investigación en: sistemas sensoriales, robótica móvil, interfaces hombre-máquina, sistemas orientados a la salud, sistemas de transporte inteligente, control distribuido y automatización, sistemas digitales empotrados, SOC y sistemas de localización y posicionamiento, que es la línea de investigación que se centra esta tesis.

Los proyectos vinculados a esta tesis han sido:

- **ALCOR:** (referencia DPI2013-47347-C2-1-R) Optimización de red de sensores inalámbricos y sistemas de control en red para cooperación de unidades móviles en entornos inteligentes.
- **Red de Posicionamiento y Navegación en Interiores (REPNIN):** (referencia TEC2015-71426-REDT)

El proyecto ALCOR tiene como objetivo el diseño de un LPS. Dentro de este objetivo se encuentran otros tres objetivos bien diferenciados: El sistema de control de los robots móviles, el sistema sensorial y la optimización de los canales de comunicación entre un centro remoto, la red de sensores y los robots.

La red REPNIN integra parte los esfuerzos de investigación y desarrollo tecnológico llevados a cabo en España en el ámbito del Posicionamiento y Navegación en Interiores (PNI) y los Espacios Inteligentes (EI), para promover el intercambio de conocimientos entre grupos de investigación de universidades y centros de investigación, potenciar las relaciones internacionales y acelerar la transferencia de tecnología a la industria.

Esta tesis está enmarcada en el desarrollo de la partes que tiene que ver con los sistemas sensoriales de los anteriores proyectos , teniendo como objetivo específico la investigación de sensores que obtengan la posición a partir de señales de infrarrojo, y que además permitan la localización de múltiples unidades móviles, independientemente de otra serie de condicionantes que puedan existir.

Esta tesis también ha sido desarrollada con la ayuda de la Universidad de Alcalá a través del programa de becas FPI (2012) de su programa propio, que también ha proporcionado los medios financieros para costear una estancia de investigación de 3 meses, por medio de las ayudas a la movilidad de la propia Universidad de Alcalá, en la universidad de Delaware (USA).

## 1.2 Motivación y objetivos de la tesis

La motivación de esta tesis es la propuesta una nueva alternativa de LPS basado en infrarrojos y sensores PSD, posiblemente la tecnología menos explorada de todas las existentes hoy en día, orientado al posicionamiento 3-D de robots móviles en interiores. El objetivo de las contribuciones que se persiguen es desarrollar un sistema LPS de bajo coste, con una precisión y cobertura similar a los sistemas basados en visión, ultrasonidos e infrarrojos existentes, con baja carga computacional y con una rápida actualización de posición. Además, se pretende que sea un sistema poco invasivo, de despliegue y ampliación sencillos y de bajo consumo.

Como objetivo general se plantea la propuesta modelado y diseño de un LPS basado en infrarrojos para determinar la posición 3-D de múltiples agentes móviles, simultáneamente, utilizando únicamente un solo sensor PSD.

Este objetivo se puede dividir en objetivos más específicos:

- Análisis de las restricciones y condicionantes tecnológicos existentes para el desarrollo del LPS basado en PSD
- Análisis de las fuentes de error del circuito acondicionador y adquisición de las señales eléctricas, y propuesta de metodologías para la corrección de los errores.
- Análisis de los efectos de distorsión del propio PSD y de los sistemas ópticos.
- Caracterización y modelado del comportamiento electrónico de todo el conjunto del sistema sensorial y un procedimiento y metodología para su calibración.
- Análisis de los efectos ópticos y geométricos y de comportamientos no lineales del conjunto sensor-sistema óptico (sensor PSD y Lente).
- Caracterización y modelado geométrico del comportamiento del sensor PSD con un sistema óptico acoplado para medida de ángulos de incidencia.
- Propuesta de un proceso para la obtención de los parámetros que modelan el sistema (calibración geométrica).
- Propuestas para la determinación de la posición 3-D de los agentes.
- Validación empírica de las propuestas y aportaciones realizadas

## 1.3 Estructura de la tesis

Esta tesis se ha organizado en 8 capítulos. Tras este primer capítulo introductorio se presenta el capítulo 2, en el que se describe el estado actual de los sistemas de posicionamientos en interiores. Se introducen y presenta los trabajos existentes en las diferentes tecnologías con las que se desarrollan los LPS y sus aplicaciones, se analizan el estado de la técnica y los trabajos relacionados con tecnologías de posicionamiento, y particularmente con infrarrojos. Además, se presentan las estrategias existentes para la determinación de la posición de agentes móviles. También se incluye en este capítulo un apartado con los trabajos relacionados con la utilización y aplicaciones de PSD, así como de aquellos que han investigado en su calibración.

En el capítulo 3, “Descripción y condicionantes de la propuesta”, se describe la propuesta de LPS en el que se basa este trabajo y las partes que lo componen, seguidamente se analizan las fuentes de error que añaden incertidumbre a la determinación de la posición 3-D de los agentes móviles en el entorno, dividiendo estas fuentes de error en las provocadas por el circuito eléctrico (Sensor PSD, circuito acondicionador de señal y digitalización de dichas señales) y las provocadas por el sistema óptico (lente y sensor PSD). Además se proponen métodos para la eliminación o mitigación de estas fuentes de error. Por último se describen varias propuestas para la determinación de la posición 3D.

En el capítulo 4, “Calibración eléctrica” se analizan las fuentes de error provocadas por el circuito eléctrico, siendo los principales factores los debidos desbalances de los diferentes canales debidos a tolerancias, derivas, a la no idealidad de los componentes electrónicos como amplificadores operacionales, al ruido en las señales y al convertidor analógico-digital. En este caso se propone un método para eliminar los errores sistemáticos del sistema, y se presentan una serie de pruebas que validan todo el análisis realizado.

En el capítulo 5, “Calibración geométrica”, se describe el modelo matemático del sistema sensorial basado en el modelo pin-hole, al que se van añadiendo los comportamientos no ideales de los sistemas, así como las no linealidades. También se presenta un procedimiento de calibración para la obtención de los parámetros de los modelos basado en el método de Zhang para la calibración de cámaras. En este caso también se analiza el proceso de calibración ante las fuentes de error eléctricas analizadas en el capítulo 4 y los efectos ópticos provocados por la lente y el sensor PSD, mostrando finalmente unas pruebas de calibración para dos lentes diferentes.

En el capítulo 6, “Propuestas para la determinación de la posición 3D con PSDs” se presentan diferentes métodos para la determinación de la posición 3-D del agente móvil con sus ventajas y desventajas. Se tiene en cuenta si los agentes se van a mover en un plano, la potencia que se recibiría en función de la posición de los agentes considerando las respuestas del emisor lente y detector, y si se va a poder disponer



de recepción estéreo en algún punto del espacio. Finalmente se introduce un método para la determinación de 3-D a partir de potencia recibida y desfase de la señal recibida en diferentes puntos. Además se analiza la sensibilidad en la determinación de las coordenadas 3-D, ante los errores en las medidas.

En el capítulo 7, “Pruebas experimentales y resultados”, se exponen las pruebas experimentales llevadas a cabo para la determinación de la posición 3-D de los agentes móviles y constatación de la viabilidad validez y precisión de las propuestas realizadas. Esto se ha realizado para las diferentes propuestas descritas en el capítulo 6.

Por último, en “Conclusiones y trabajos futuros” se presentan las conclusiones globales de esta tesis, así como las potenciales líneas de investigación que pueden desarrollarse a partir de este trabajo.

## Capítulo 2

# Estado del Arte

En este capítulo se pretende mostrar los trabajos desarrollados en aquellas áreas de investigación relacionadas con esta tesis, haciendo particular hincapié en los sistemas de posicionamiento local o LPS (Local Positioning System) y más concretamente los sistemas basados en infrarrojo para posicionamiento en interiores. Además, también se describirán trabajos relacionados con métodos de calibración de sistemas ópticos y aquellos que tienen que ver con la utilización y comportamiento de sensores PSD.

Este capítulo se estructura de la siguiente manera: inicialmente se describen los LPS de forma general, seguidamente se presentan aplicaciones y posteriormente se presentan las tecnologías de posicionamiento existentes que actualmente se utilizan y sobre las que hay numerosos trabajos, de los cuales se detallarán algunos de los más relevantes, haciendo más hincapié en aquellos LPS basados en infrarrojos, dado que es la temática de investigación de esta tesis. Después se presentan los trabajos sobre las técnicas y estrategias que actualmente se vienen utilizando para la determinación de la posición de agentes móviles. Tras esa revisión y análisis de estado de la técnica, se enfoca más el estudio del funcionamiento de PSDs y de los trabajos e investigaciones realizados con ellos para llevar a cabo medidas. Se termina este capítulo del estado del arte haciendo una revisión de las metodologías existentes de calibración de conjuntos sensores-lente, fundamentalmente de cámaras que son los sistemas que han que lo han necesitado hasta ahora.

### 2.1 Sistemas de posicionamiento en interiores

Dado el éxito en los sistemas de posicionamiento globales (GPS) el cual ha resultado ser un sistema muy aplicable y útil en el ámbito civil y militar, pero que no da solución a las necesidades de localización en interiores, con lo que han aparecido trabajos de sistemas de LPS, para dar respuesta al posicionamiento en aquellas áreas y localizaciones donde los sistemas de posicionamiento global no son solución. A diferencia de los sistemas de posicionamiento en exteriores, en los LPS no existe una solución definiti-

va y única, ya que, existe un abanico de tecnologías (Infrarrojo, Visión, Ultrasonidos, etc.), con diferentes características y también una gran variedad de aplicaciones que no necesitan la misma precisión y que posibilitan que a cada una de ellas se le pueda dar respuesta con unas u otras tecnologías de forma eficaz. Por tanto, la elección de la tecnología para la implantación de un LPS vendrá determinado por varios factores, que se pueden agrupar por: los requisitos que dependen del usuario, como son el coste del LPS, el mantenimiento, la privacidad, precisión necesaria, etc., y los requisitos técnicos velocidad de actualización de la posición, el radio de cobertura, la precisión que puede alcanzar, consumo eléctrico, infraestructura, etc.

Una problemática general de estos sistemas, viene dada por la geometría y ocupación del entorno que no siempre es un paralelepípedo y además puede tener elementos que no permitan un camino libre de obstáculos entre emisores y detectores, y por tanto con zonas de sombra. Algunos sistemas requieren de visión directa, además los sistemas también pueden verse afectados por señales de multicamino, que, en muchos casos, hacen que el sistema no sea útil debido a los errores provocados por las señales que se reflejan en el entorno; estos errores afectan tanto por potencia, como por fase o ángulo de llegada. Otros sistemas como los basados en señales de radiofrecuencia, se ven afectados por la absorción de los materiales, condicionando mucho la medida a partir de la potencia recibida.

Sin embargo, frente a todos estos hándicaps los LPS también presentan algunas ventajas y aspectos positivos: existen una gran variedad de tecnologías y por tanto existe la opción de elección, las zonas a cubrir son generalmente pequeñas, los agentes a posicionar se suelen desplazar con velocidades no muy altas y no se ven influenciados por la meteorología. Algunos LPS tienen la ventaja de utilizar sistemas ya instalados y por tanto el coste de la infraestructura disminuye. En otros casos el LPS se debe diseñar de forma Ad-Hoc para un entorno concreto, pudiendo minimizar aquellos problemas debidos al entorno y mobiliario, pero debiendo hacer el despliegue de los sistemas.

En el siguiente apartado, se van a describir algunas de las aplicaciones en las que tiene cabida la utilización de un LPS.

## 2.2 Aplicaciones

Los LPS se pueden utilizar en diversas áreas, como son la asistencia a las personas, tanto en la vida cotidiana (robots asistenciales) o trabajo (en misiones de vigilancia) y para el desarrollo de tareas de forma autónoma por parte de robots móviles. A continuación, se muestran varias aplicaciones de los LPS.

- Aplicaciones relacionadas con ambientes domésticos. Estas han sido desarrolladas principalmente para el apoyo a personas con discapacidades o personas mayores [Rashidi and Mihailidis, 2013]. Así por ejemplo, se utilizan para la moni-

torización de la salud de los usuarios, y para interactuar y ayudar ante algunos problemas, o incluso para evitar la aparición de estos.

- Otra área de aplicación, se basa en obtener información de recorridos realizados de los usuarios en grandes superficies; conociendo las trayectorias de los diferentes tipos de usuarios [Hansen et al., 2009], se sitúan los productos y publicidad estratégicamente, y se ofrecen servicios a los usuarios, fijan diferentes precios, etc.
- Otros servicios que se puede ofrecer basados en LPS, son: el guiado de personas por grandes espacios como en aeropuertos, estaciones de tren, museos, supermercados, librerías, etc. Así por ejemplo, encontramos [Aittola et al., 2003] que desarrolla un sistema de guiado de personas dentro de una librería, la aplicación se basa en utilizar una PDA la cual te guía hasta el libro que se busca, utilizando la WLAN. Otro sistema de guiado de personas por WLAN se muestra en [Kourouthanassis and Roussos, 2003] el cual esta destinado a la navegación por dentro de un supermercado; el sistema se basa en un carro con un ordenador en el cual insertas el producto y el propio carro te guía por el camino más rápido. También en [Gusenbauer et al., 2010] el sistema se basa en la navegación dentro de un espacio, pero esta vez de vehículos dentro de un parking, donde se encaminan hacia el lugar donde existe una plaza libre, o se proporciona un apoyo para acceder a la salida
- Otras aplicaciones menos comerciales pero muy útiles son aquellas orientadas a la seguridad, como ocurre en sistemas en hospitales [Calderoni et al., 2015], cárceles, estaciones de metro, aeropuertos, tren, etc. Estos servicios pueden ser interesantes, para conocer la posición de personal de servicio, como agentes de seguridad, médicos, enfermeros, para dar una rápida respuesta en caso de una emergencia, también puede ser interesante conocer la posición de objetos, como sillas de ruedas, equipos médicos, etc. En el trabajo citado [Calderoni et al., 2015] se basa en el control de pacientes en un hospital, cubriendo 48 habitaciones en más de 4000 m<sup>2</sup>; la tecnología utilizada es RFID, debido a las posibles interferencias de otras tecnologías, consiguiendo de este modo que en el 83 % de los casos el paciente estaba en la habitación calculada por el sistema LPS.
- También existen servicios orientados a la mejora de la experiencia de las personas en un entorno como puede ser el caso de los museos [Grinter et al., 2002], donde la información recibida por el usuario es acorde a la posición de este, haciendo más entretenida dicha experiencia.
- Otro tipo de aplicaciones son las destinadas a la interactividad, como en el caso de los videojuegos. Estos, en los últimos años han dado un gran paso para evolucionar la interacción del usuario con el juego, dotando a las videoconsolas de

aparatos, como la Kinect de Microsoft o los mandos de Nintendo que determinan la posición 3D y/o desplazamientos y movimientos del usuario.

- Algunas aplicaciones en el ámbito industrial van destinadas a las denominadas fabricas inteligentes [Wiesner et al., 2017], donde se requieren maquinas autónomas que se desplacen y cooperen entre ellas para realizar diferentes tareas. Así, por ejemplo, se pueden encontrar robots para el reconocimiento y mapping de zonas de las que no se tiene información, o tareas de llevar de un punto a otro paquete, etc. Así, por ejemplo en [Trulls et al., 2011] desarrollan un trabajo el cual consiste en escanear zonas peatonales utilizando dos sistemas láseres (uno vertical y otro horizontal). Otro trabajo más orientado a los robots autonomos dentro de fabricas se presenta en [Röwekämper et al., 2012], en el cual consiguen utilizando láseres, los cuales hacen barridos para el escaneo del escenario con precisiones en el posicionamiento de 7 mm de media y errores en la orientación de 0.15 grados.

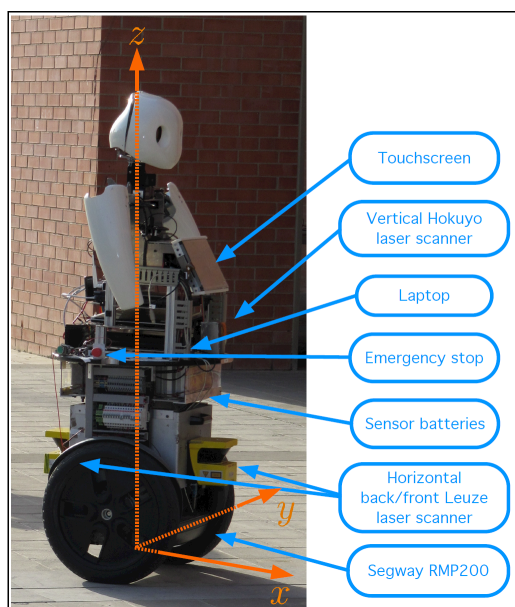


Figura 2.1: Robot autónomo para mapeado de entornos [Trulls et al., 2011]

Como se ha podido comprobar a partir de los ejemplos enumerados, existen una gran variedad de aplicaciones para los LPS, y que abren la puerta a que otras aplicaciones en las que actualmente los LPS no se utilizan, puedan en el futuro, con el desarrollo de estos sistemas, beneficiarse de sus servicios y prestaciones.

## 2.3 Tecnologías de posicionamiento

Como ya se ha comentado no existe una única tecnología válida para cualquier aplicación, es por ello, que dentro de los LPS existe un abanico grande de tecnologías a

poder utilizar como se describe en [Mautz, 2012]. En la figura 2.2 se muestran las diferentes tecnologías utilizadas para LPS, en función de la precisión y de la cobertura que ofrecen cada una de ellas.

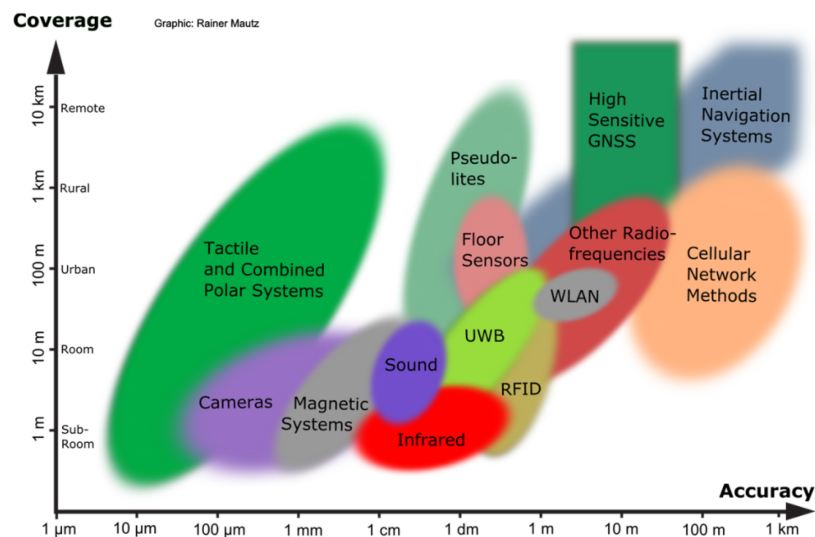


Figura 2.2: Tecnologías de LPS ordenadas por precisión y área de cobertura. [Mautz, 2012]

En la figura 2.2 se ve gráficamente que la elección de la tecnología va a depender de las precisiones y áreas de cobertura que se requiera, y en el caso de que varias de estas tecnologías cumplieren con esos dos requisitos, se elegiría en función de la infraestructura (problemas en la naturaleza de la señal, tasa de datos enviados, tecnología de comunicación) y coste (instalación, mantenimiento, etc.).

Dentro de todas estas tecnologías se van a describir algunas de ellas, así como algunos trabajos basados en las mismas.

### 2.3.1 Visión

Los LPS basados en visión son actualmente la tecnología dominante, ya que combina un área de cobertura grande (0.5-10 metros) y una precisión de milímetros. Además se ha incrementado el uso de visión artificial de forma muy notoria en los últimos años debido a la mejora de la tasa de datos transmitidos, a los nuevos algoritmos para el procesamiento de imágenes y la mejora de la potencia computacional de los ordenadores.

Los LPS basados en visión se pueden clasificar bajo diferentes criterios, de entre ellos el criterio que se ha escogido ha sido dividirlos en aquellos sistemas que llevan la cámara a bordo del agente móvil y los LPS donde las cámaras están ubicadas en el entorno.

- **Cámara fijada a bordo del agente móvil:** Esta técnica para la determinación de la posición 3-D, permite obtener la posición absoluta del agente móvil con respecto

al entorno a partir de marcas ubicadas en el entorno, estas pueden ser marcas naturales o artificiales.

Algunas alternativas en la que se utilizan marcas naturales se basan en tomar imágenes en el entorno de interés, obtener características de esas imágenes y crear una base de datos de las marcas y la posición del agente móvil. Posteriormente se comparan las imágenes que va tomando el agente móvil con la base de datos (figura 2.3). Así, por ejemplo, en [Koch et al., 2014] utilizan señales comunes en algunos edificios (Señal de salida, extintor, etc.), para determinar la posición 3-D y en [Kim and Jun, 2008] utilizan como marcas el mobiliario, las ventanas o las puertas; en este caso también hacen uso del posicionamiento por WLAN para acotar la búsqueda en la base de datos y reducir así posibles errores.

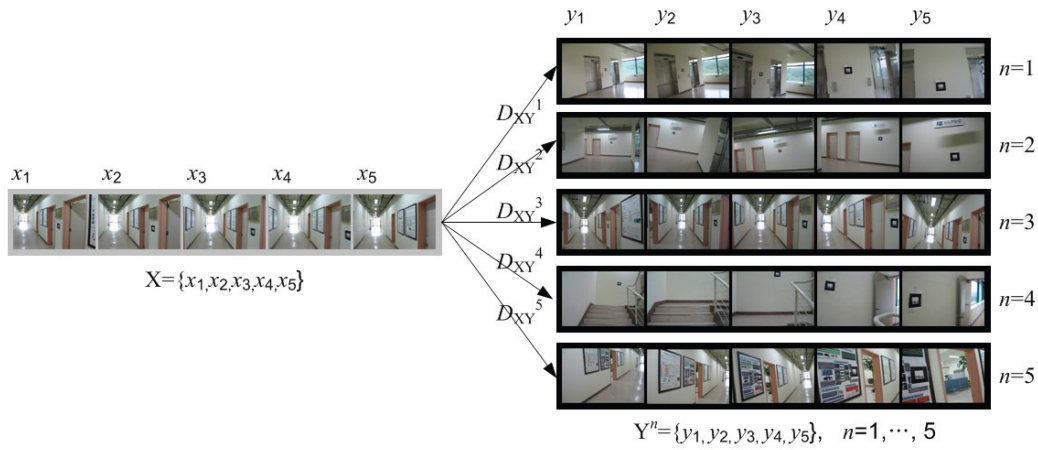


Figura 2.3: Comparación de imágenes captadas con las existentes en la base de datos, [Kim and Jun, 2008]

En el caso de utilizar marcas artificiales el sistema es más fácil de implementar, ya que el diseño de dichas marcas se realiza de forma que cada marca sea única y por tanto, dependiendo de la perspectiva en la que se ve la marca desde la cámara, se puede determinar la posición 3-D del agente móvil.

Trabajos de este tipo se pueden encontrar en [Guo and Xu, 2006], el cual emplea marcas formadas por rectángulos simétricos y un número definido por 7 segmentos. De igual manera, en [Rostkowska and Topolski, 2015] utilizan códigos QR como se muestra en la figura 2.4.

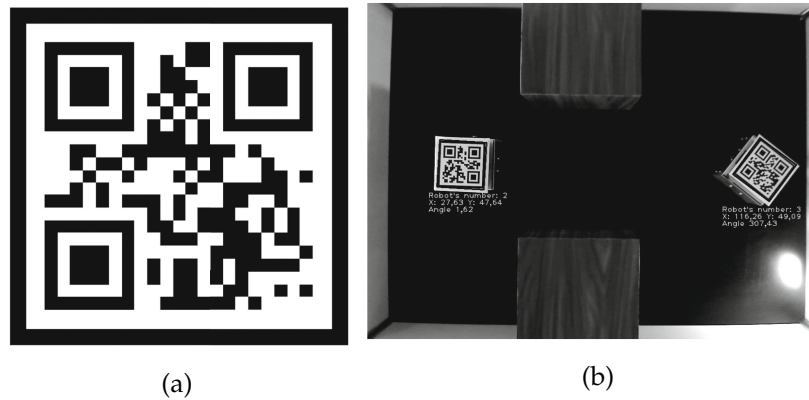


Figura 2.4: Marcas artificiales para determinar posición 3-D e identificación de robots móviles, (a) Marca utilizada en [Rostkowska and Topolski, 2015]; (b) Vista general del entorno [Rostkowska and Topolski, 2015]

Otro tipo de marcas utilizadas en este tipo de técnicas de posicionamiento, se muestra en [Hijikata et al., 2009] donde utilizan LEDs infrarrojos posicionados por el entorno, como se muestra en la figura 2.5, este tipo de marcas permiten funcionar independientemente de la iluminación.

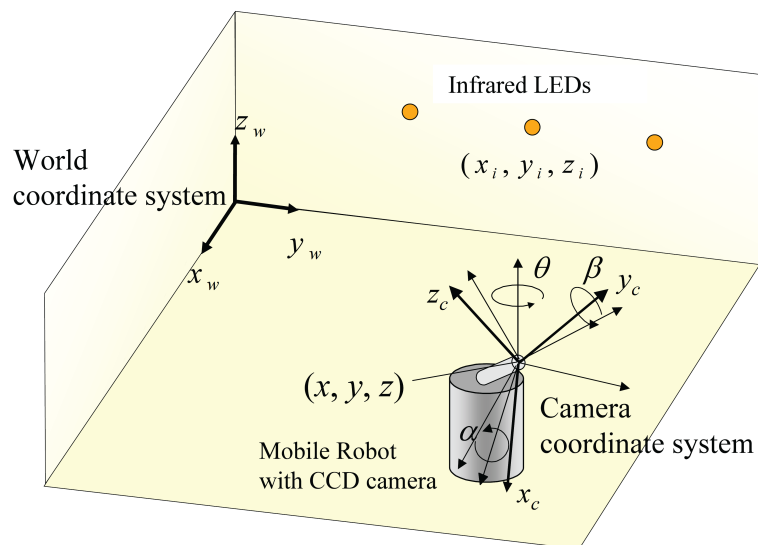


Figura 2.5: LPS basado en visión y marcas artificiales utilizando LEDs IR [Hijikata et al., 2009]

- **Cámaras fijadas en el entorno:** En este caso, la determinación de la posición 3-D del agente móvil puede resolverse de varias formas, pudiéndose agrupar también en dos grupos: marcas artificiales y marcas naturales. A continuación, se presentarán varios de estos trabajos.

Dentro del uso de las marcas artificiales, se encuentran diversos trabajos, como en [Fan et al., 2008] que emplea una marca diseñada por un conjunto de líneas y un triángulo, como se muestra en la figura 2.6.a. En [Liang et al., 2008] la identificación del robot se realiza por medio de marcas rectangulares de diferentes colores.



También, se pueden emplear otro tipo de marcas como el trabajo [Fernández et al., 2007], en el cual la marca es una estructura en forma de T formada por LEDs IR (figura 2.6.b). Este tipo de marcas tiene la ventaja de que puede ser detectada, aun cuando la iluminación en el entorno es baja; además la forma de la marca permite obtener la posición 3-D y la orientación de forma rápida y sencilla.

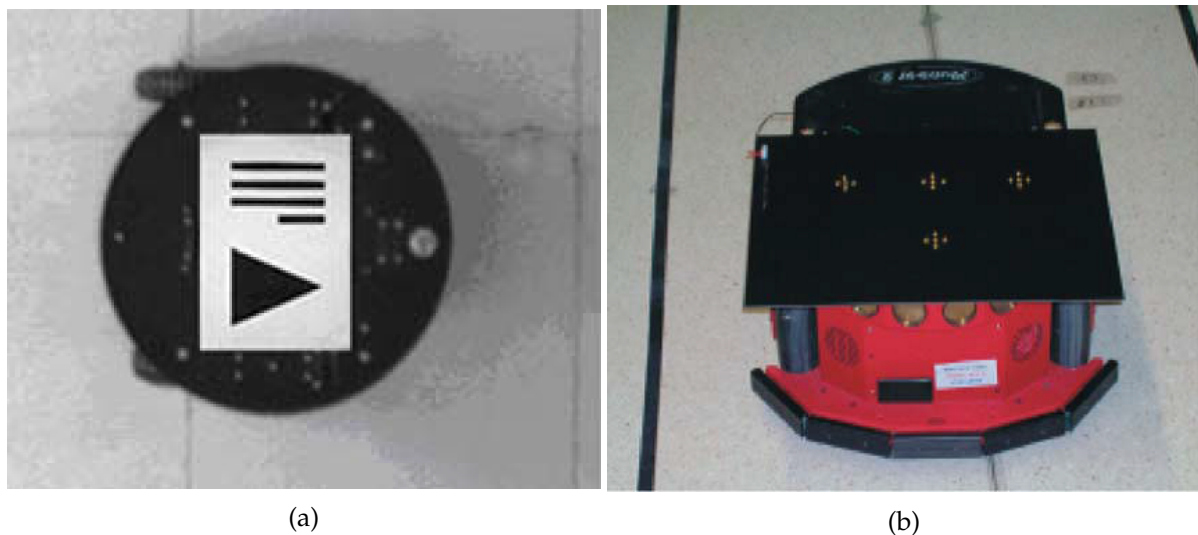


Figura 2.6: Marcas artificiales para determinar posición 3-D e identificar de robots móviles; (a) Marca utilizada en [Fan et al., 2008]; (b) Marca utilizada en [Fernández et al., 2007]

Este método permite obtener resultados muy buenos en el posicionamiento de los agentes móviles, aunque tiene el inconveniente que únicamente puede posicionar el agente móvil con alguna marca artificial, además no se explota la ventaja de utilizar toda la información que contienen las imágenes.

En cuanto al posicionamiento con marcas naturales, surgen de las restricciones de los métodos que se basan en marcas artificiales que solo pueden determinar la posición de dichas marcas. Este tipo de métodos es capaz de determinar la posición 3-D de los agentes móviles por medio de las características geométricas de los agentes móviles o de los desplazamientos de los agentes móviles.

En un principio, la determinación de la posición del agente móvil se realiza detectando los bordes de los objetos en las escenas, junto con los parámetros intrínsecos de la cámara. Estas técnicas ya no son muy empleadas en la actualidad debido a los errores que se cometen en la detección de bordes.

También existen otras alternativas que se basan en los movimientos de los agentes móviles, estas técnicas comparan las imágenes tomadas en diferentes instantes de tiempo y relacionan los puntos que han cambiado de posición, obteniendo de esa manera el desplazamiento de los agentes móviles.

Todas estas técnicas requieren un conocimiento previo de los agentes móviles, es por ello que surgen otras técnicas que no necesitan dicho conocimiento, como en

[Pizarro et al., 2009], que a través de un conjunto de cámaras ubicadas en el entorno obtiene un modelo tridimensional del agente móvil y seguidamente realiza el seguimiento del agente móvil.

### 2.3.2 Ultrasonidos (US)

Los ultrasonidos son una de las tecnologías más utilizadas para el desarrollo de LPS, se basa emitir ondas mecánicas sónicas a frecuencias superiores a las audibles por el ser humano, en torno a los 40kHz. La precisión de los ultrasonidos está en el orden de los cm y el tipo de medida es muy variable encontrando sistemas en los cuales el emisor y receptor están ubicados en el mismo soporte o teniendo a estos separados, pudiendo medir distancia por tiempo de vuelo o por diferencias de tiempo de llegada.

En el caso de que receptor y emisor estén separados, da lugar a dos configuraciones: que los receptores estén distribuidos por el entorno y el agente móvil lleve acoplado el emisor, siendo el entorno el que determina la posición del agente móvil o al contrario que los emisores sean los que estén distribuidos por el entorno siendo el agente móvil quien lleve acoplado el receptor y sea quien determine su posición, En este caso la ventaja es que no importa el número de usuarios ya que siempre el número de señales se muestra invariante.

Así, por ejemplo, encontramos [Harter et al., 2002] en el cual se distribuyen por el entorno una red de receptores ultrasónicos y un usuario lleva colgado al cuello un dispositivo emisor, y por medio de tiempo de vuelo se determina la posición del usuario, siendo en el 95 % de los casos con una precisión menor a 9 cm. Para la medición de tiempo de vuelo utilizan un sistema de radio para sincronizar emisores y receptores. Otro sistema es el que se describe en [Priyantha et al., 2000] que al contrario del anterior ubica los emisores en el entorno y el receptor en el usuario; en este caso la posición se determina de forma local, garantizando la privacidad del usuario.

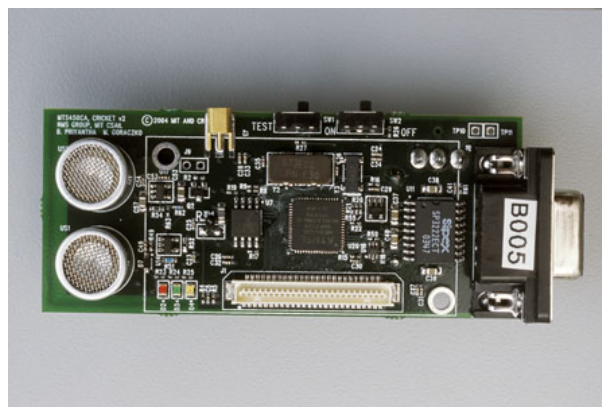


Figura 2.7: Receptor utilizado en el proyecto cricket [Priyantha et al., 2000]

En cuanto a los problemas de esta tecnología, destaca el provocado por los multicaminos, sobretudo cerca de paredes y obstáculos, ya que la diferencia entre los caminos

no directos y el directo son mínimas, siendo difícil eliminar la parte no directa. En [Álvarez et al., 2017], desarrollan un método por el cual reducen el efecto del multicamino, obteniendo errores por debajo de los 7 cm en el 91 % de los casos, incluso con SNR muy bajas (0-12 dB).

Otro ejemplo de LPS basados en ultrasonidos es [Medina et al., 2013], donde ubican 4 transmisores de ultrasonidos en el techo de una habitación y el receptor sobre el agente móvil. El posicionamiento lo realizan por lateración a partir de la medida de distancia por medio de tiempo de vuelo (ToF) de cada receptor, consiguiendo en el rango de 2 a 6 metros errores medios de 1 cm.

### 2.3.3 Redes inalámbricas de ámbito local (WLAN)

Posiblemente esta sea la tecnología más práctica, ya que, en muchos de los entornos que se podría implantar un LPS ya existe una infraestructura de red WLAN, como en centros comerciales, museos, hospitales, estaciones de tren, aeropuertos, etc. Además, la cobertura de esta tecnología es muy amplia abarcando aproximadamente los 100 metros. Sin embargo, su precisión comparada con otras tecnologías es baja, encontrándose alrededor del metro en el mejor de los casos. Por ello que esta tecnología está orientada a aplicaciones que no requieran de gran precisión si no de una localización aproximada.

Todo esto añadido al uso de los actuales *smartphones* que incorporan receptores Wi-Fi, hacen de esta tecnología sea interesante en esos casos, como por ejemplo, en los se pretende guiar a los usuarios por el entorno.

La determinación de la posición 3-D del agente móvil se puede realizar por diferentes estrategias, siendo la medición de la potencia recibida (RSS- Received Signal Strength) la más extendida. Esto presenta algunos inconvenientes, dado que el hardware destinado al uso de redes WLAN no ha sido diseñado para medición de potencias recibidas y, por lo tanto, no hay un estándar con lo que, dependiendo del hardware utilizado las potencias medidas pueden variar considerablemente.

Además, estos sistemas presentan otros inconvenientes que impiden que las precisiones sean mejores, como son las interferencias, reflexiones, atenuaciones debidas al entorno, etc. Las estrategias se pueden clasificar en cuatro grupos como se indica en [Liu et al., 2007] que se explican a continuación:

- **Sistemas basados en el modelado de la propagación:** Debido al hecho que el canal de propagación no es uniforme, sino que depende del entorno, complica obtener un modelo que describa fielmente la propagación de las señales desde el emisor hasta el receptor. Por eso la medida de potencia recibida no es precisa para el posicionamiento basado en el modelo de la propagación de señales.

A partir de esto, se han elaborado más modelos que tienen en cuenta el entorno [Chrysikos and Kotsopoulos, 2013], sin embargo, requieren de un conocimiento

de las propiedades de las paredes, suelos, columnas, etc. junto con algoritmos que identifiquen el camino directo.

- **Cell-ID:** Esta estrategia se basa en posicionar el agente móvil en la posición del nodo más cercano, es decir, al nodo que recibe más potencia [Trevisani and Vitaletti, 2004]. Es por ello que esta técnica tiene una precisión muy baja, en torno a las decenas de metros, por lo que su uso está más relacionado con sistemas de posicionamiento en exteriores. En la figura 2.8 se muestra un ejemplo de este método de posicionamiento.

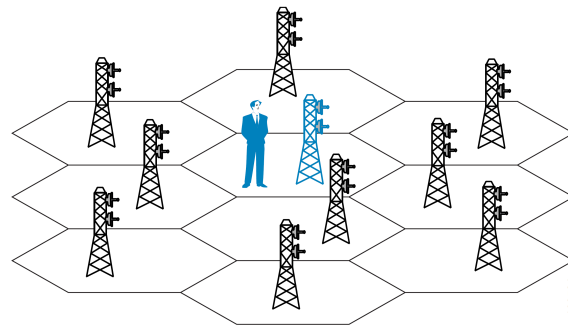


Figura 2.8: Estrategia de posicionamiento Cell-ID; figura obtenida del capítulo 2 del libro Wi-Fi location-Based Services 4.1 Design Guide

- **Sistemas basados en distancia:** Este sistema se basa en estimar la posición 3-D del agente móvil por la diferencia de potencias a varios nodos [Mazuelas et al., 2009]. En este caso la problemática es la misma que en los métodos basados en el modelado de la propagación de la señal, ya que la potencia recibida variará dependiendo el entorno.
- **Fingerprinting:** Esta estrategia es la más utilizada por los sistemas basados en WLAN; el método tiene dos pasos, uno offline que consiste en calibrar el entorno, midiendo las potencias de los puntos de acceso y las posiciones desde que se tomaron dichas mediciones, creando así una base de datos y el siguiente paso online en el cual se determina la posición del agente móvil comparando las potencias con la base de datos. En [He and Chan, 2016] se presenta una revisión de los trabajos más recientes en esta área y en la figura 2.9 se muestra un ejemplo de la calibración de un entorno, mostrando las potencias de los puntos de acceso por colores.

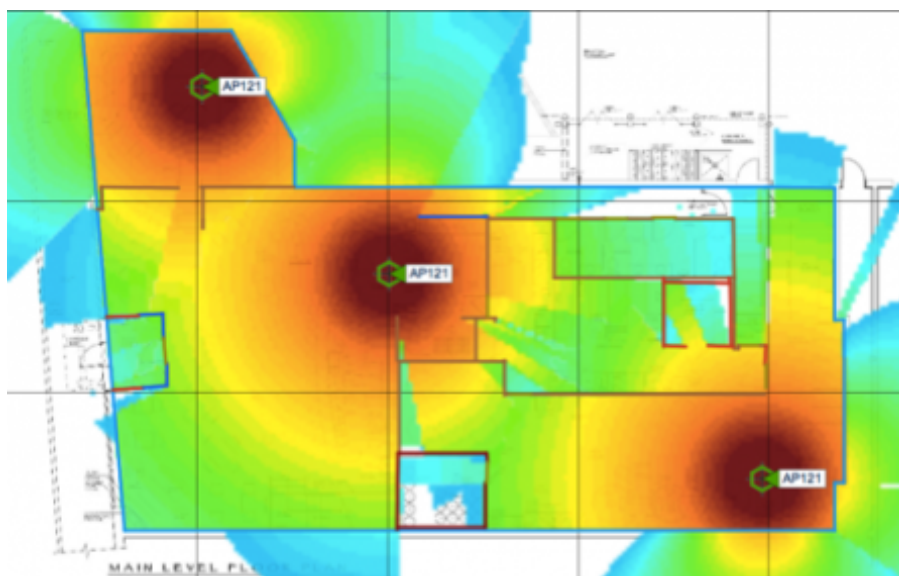


Figura 2.9: Ejemplo de un LPS basado en WLAN y Fingerprinting. Imagen extraída de <http://www.cogapp.com/blog/indoor-positioning>

Las precisiones que se pueden obtener por este método son de un metro aproximadamente. Sin embargo, la potencia recibida es un parámetro muy inestable que depende de muchos factores como: la orientación del móvil, la humedad en el ambiente, incluso las personas como se explica en [Garcia-villalonga and Perez-navarro, 2015]. Aunque el factor más determinante es la potencia emitida por el punto de acceso, ya que esta es también inestable en cortos periodos de tiempos y además varía con el tiempo, con lo que debe irse calibrando cada cierto tiempo. En el trabajo citado anteriormente [Garcia-villalonga and Perez-navarro, 2015] analizan el efecto que tiene el cuerpo frente a las señales Wi-Fi y como afecta esto en la determinación de la posición incrementándose el error en un 11 %. Además, analizan diferentes algoritmos los cuales algunos minimizan el error de forma más eficiente en espacios exteriores y otros en espacios interiores.

Para reducir el esfuerzo para la construcción de la base de datos, en [Sorour et al., 2015] se presenta un trabajo en el que se reduce el esfuerzo de la calibración en un 70-80 %, incrementando el error en 0.8 metros. Otro problema de estos sistemas, es la autonomía de los *smartphones* utilizados para el posicionamiento, ya que estos sistemas tienen un consumo elevado, con lo que en [Niu et al., 2013], utilizan ZigBee en vez de Wi-Fi, ya que eso permite reducir alrededor del 66 % el consumo.

Uno de los trabajos más representativos es el sistema RADAR [Bahl and Padmanabhan, 2000], en el que se muestra algunos de los factores que influyen en la medición de la potencia recibida, y cómo mediante 3 nodos que cubren un área de cobertura de 1000 m<sup>2</sup> obtienen unas precisiones de 5 metros. Otro trabajo más reciente es [He et al., 2015] en el que combinan los métodos de fingerprinting junto a la trilateración, consiguiendo resultados un 20 % mejores que en el caso de utilizar los métodos individualmente.

## 2.4 Infrarrojos

Esta tecnología, como se comentó en la introducción, es la utilizada en esta tesis para el desarrollo de un LPS. En cuanto a la cobertura de los trabajos previos a este, está en el rango de 1-5 metros, con precisiones comprendidas entre 1-10 centímetros.

El uso de infrarrojos en sistemas de posicionamiento en interiores es posiblemente la tecnología menos utilizada, motivado en gran medida por la escasez de sensores. Además, esta tecnología ha sido utilizada sobre todo para mediciones de distancias grandes en exteriores o para mapear edificios con el uso de láseres [Ouellette et al., 2007] [Trulls et al., 2011].

En cuanto a sistemas de posicionamiento locales, hay que mencionar uno de los primeros trabajos realizados con infrarrojos que además se llegó a implantar en un hospital en el año 92 [Want et al., 1992]. El uso de este sistema estaba orientado tanto al posicionamiento del personal del hospital como de los pacientes y consistía en un emisor IR que se colgaba en el cuello y emitía señales codificadas para la identificación de la persona.

En algunos trabajos se combinan el uso de cámaras con LEDs IR (o IRED), ya que utilizar luz infrarroja conlleva varias ventajas como que son invisibles al ojo humano, además de mejorar la visibilidad de las cámaras [Hijikata et al., 2009]. Otro ejemplo se muestra en [Aitenbichler and Mühlhäuser, 2003] donde utilizan dos cámaras para determinar la posición 3-D por medio de visión estéreo, siendo el objetivo una PCB con varios LEDs como se muestra en la figura 2.10, en la que se pueden ver varios LED en fila que se utilizan como identificadores de agentes móviles.

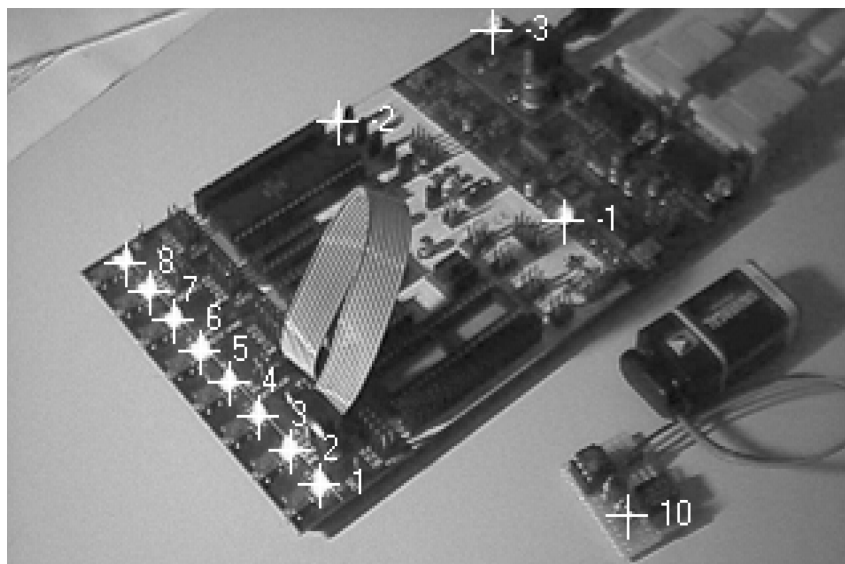


Figura 2.10: Tarjeta electrónica con LEDs IR utilizada en [Aitenbichler and Mühlhäuser, 2003]

En cuanto al uso de fotodiodos encontramos trabajos como [Jung et al., 2014], en el que el método escogido para la determinación de la posición ha sido la diferencia



de potencias recibidas, con lo que, ubicando el fotodiodo sobre el robot móvil, este recibirá la señal de 4 o más IRED ubicados en el techo del entorno, y con las diferencias de potencias obtiene las diferencias de distancias y por lateración se obtiene la posición del robot móvil, con errores medios de 3.24 cm, sin embargo estos errores a medida que se acercan a una pared crecen de forma muy notoria llegando incluso a los 10 cm de error.

Otros trabajos donde utilizan fotodiodos y LEDs IR son los realizados por el grupo GEINTRA. Los cuales determinan la posición 3-D de un agente móvil por medio diferencias de fases de llegada (PDoA) de las señales a 4 o más fotodiodos distribuidos en el entorno. En el trabajo de [Gorostiza et al., 2011] se utilizan señales sinusoidales a 6 MHz, en el que consiguen precisiones por debajo de 10 cm, siendo la mayor problemática el bajo SNR de las señales.

En [Salido-monzú et al., 2014] se centra el trabajo en la digitalización del sistema y la mitigación del mayor problema que existe en los sistemas de posicionamiento en interiores basados en infrarrojo que son los multicaminos. Para reducir el efecto del multicamino propone utilizar un Delay-Locked Loop para obtener el sincronismo de la secuencia enviada por el emisor IR, para después demodular dicha señal y por medio de un demodulador I/Q determinar la fase de llegada. Otra limitación con la que se encuentran estos sistemas que se basan en medidas diferenciales de fase o tiempos, es la sincronización de los osciladores de los ADC de los diferentes receptores, ya que diferencias pequeñas (pocos ns) equivalen a centímetros o incluso metros de error, con lo que los receptores actualmente deben tener en común el ADC y por tanto cablear los sensores con dicho ADC.

## 2.5 Técnicas de posicionamiento

Independientemente de la tecnología a utilizar, un sistema de localización consta de una serie de dispositivos que emiten una señal (Ultrasonidos, radiofrecuencia, luz, etc.) y otros dispositivos que reciben dicha señal. Tras la adquisición de dichas señales se obtienen diferentes parámetros (fase, potencia, ángulos, tiempo) los cuales se utilizan para la determinación de la posición 3-D de los agentes móviles.

A continuación, se van a describir algunas de las estrategias más comunes para la determinación de la posición del agente móvil a partir de las medidas realizadas.

### 2.5.1 Estrategias para la determinación de la posición del agente móvil

La estrategia a utilizar vendrá dada, por la tecnología en que se basa el LPS, tipos de sensores, número de receptores, etc., pudiendo combinar varias de las estrategias. Estas estrategias son, esencialmente:

- **Trilateración esférica**

La trilateración esférica es un método basado en las medidas de distancias. La determinación de las distancias se puede obtener por medio de medidas de tiempo absoluto (ToA) como en [Mandal et al., 2005] o por medio de potencias recibidas (RSS) como en [Aguirre et al., 2016]. Una vez calculadas las distancias entre receptores y emisor, la determinación de la posición 3-D vendrá dada por la intersección de las esferas, con centros en los receptores y radio el valor de la distancia. En la figura 2.11 se muestra un ejemplo de este método.

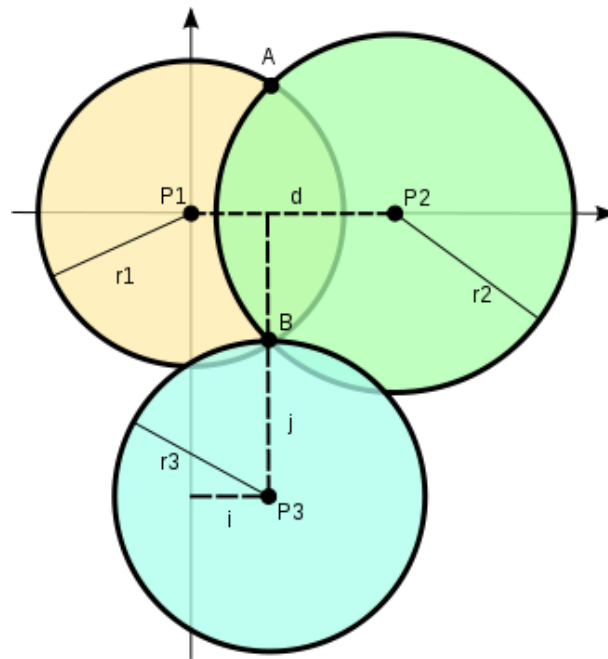


Figura 2.11: Representación gráfica de la trilateración esférica

donde ( $P_1$ ,  $P_2$  y  $P_3$ ) con las posiciones de los receptores, ( $r_1$ ,  $r_2$  y  $r_3$ ) las distancias entre los receptores y el transmisor. En este caso el transmisor está ubicado en  $B$ , que es donde cortan las tres circunferencias.

- **Trilateración hiperbólica o multilateración**

La trilateración hiperbólica, a diferencia de la esférica, esta se basa en medidas diferencias de distancia, el método por el que se obtienen estas diferencias, puede ser por diferencias de tiempo de llegada (TDoA) como utilizan en [Makki et al., 2016], diferencia de potencias recibidas (RSS) con en [Chang et al., 2010] o diferencia de fase de llegada (PDoA) como en [Nadeem et al., 2014].

En este caso, para la determinación de la posición será necesario un receptor adicional, es decir, como mínimo se necesitan 4 receptores. A partir de las diferencias de distancias, se pueden trazar hipérbolas entre los receptores y el receptor de referencia; el punto de intersección de estas hipérbolas será la posición del agente móvil.



En la figura 2.12, se muestra un ejemplo de multilateración reducido a un espacio 2D, donde con 3 receptores se tienen dos hipérbolas, siendo la posición del agente móvil la intersección de estas. Este método tiene menos precisión que la trilateración esférica, y además está muy relacionada con la posición de los receptores.

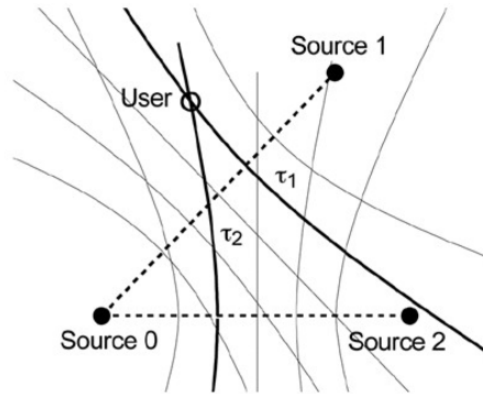


Figura 2.12: representación gráfica de la multilateración

### • Triangulación

La triangulación es un método basado en las medidas de ángulos de llegada (AoA). Así, por ejemplo, este método es muy utilizado en sistemas de visión estereó. Conociendo el ángulo en el cual está posicionado el agente móvil con respecto a dos receptores, se pueden trazar rectas en esa dirección y donde se corten esas dos rectas se sitúa la posición del agente móvil. Un ejemplo de este modo de posicionamiento se muestra en [Lee et al., 2010] y [Horikawa et al., 2015]

En la figura 2.13, se muestra un ejemplo de posicionamiento mediante visión estereó utilizando dos cámaras.

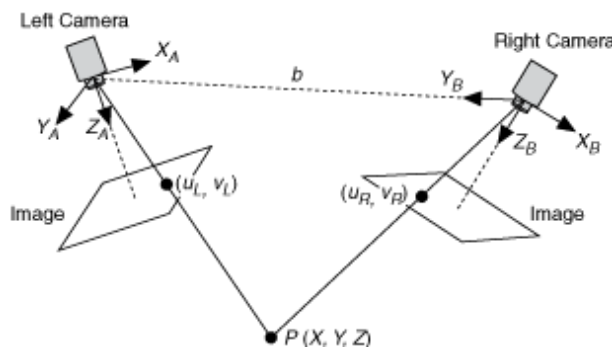


Figura 2.13: Esquema de posicionamiento basado en AoA a dos sensores (posicionamiento estereó)

## 2.6 Sensores PSD (Position Sensitive Dectector)

Estos sensores son fotodiodos y como tal generan una corriente cuando un haz de luz impacta sobre su superficie. Sin embargo, a diferencia de los fotodiodos normales estos tiene 4 ánodos (electrodos) en vez de 1, estando estos posicionados en el borde de su área activa (normalmente cuadrada). La corriente que se genera se reparte entre los ánodos de forma inversa a la distancia entre el punto de impacto y cada electrodo, siendo análogo a un divisor de corriente y siendo los valores de la resistencia dependiente de la distancia al punto del impacto. Por tanto, mediante las diferencias de corrientes medidas en cada electrodo se puede obtener el punto de impacto 2-D del haz de luz sobre la superficie del sensor.

En la actualidad hay diferentes tipos de sensores PSD [[Hamamatsu](#), ] que se pueden agrupar en unidimensionales y bidimensionales; en cuanto a los bidimensionales, que son los de interés para esta tesis, existen a su vez diferentes tipos (figura 2.14), duo-lateral, tetralateral y pin-cushion, las diferencias entre los sensores principalmente recaen en la posición de sus electrodos. Los PSD de tipo pin-cushion stienen ventajas sobre los otros tipos en cuanto a menores corrientes de oscuridad, mejores tiempos de respuestas y menor distorsión.

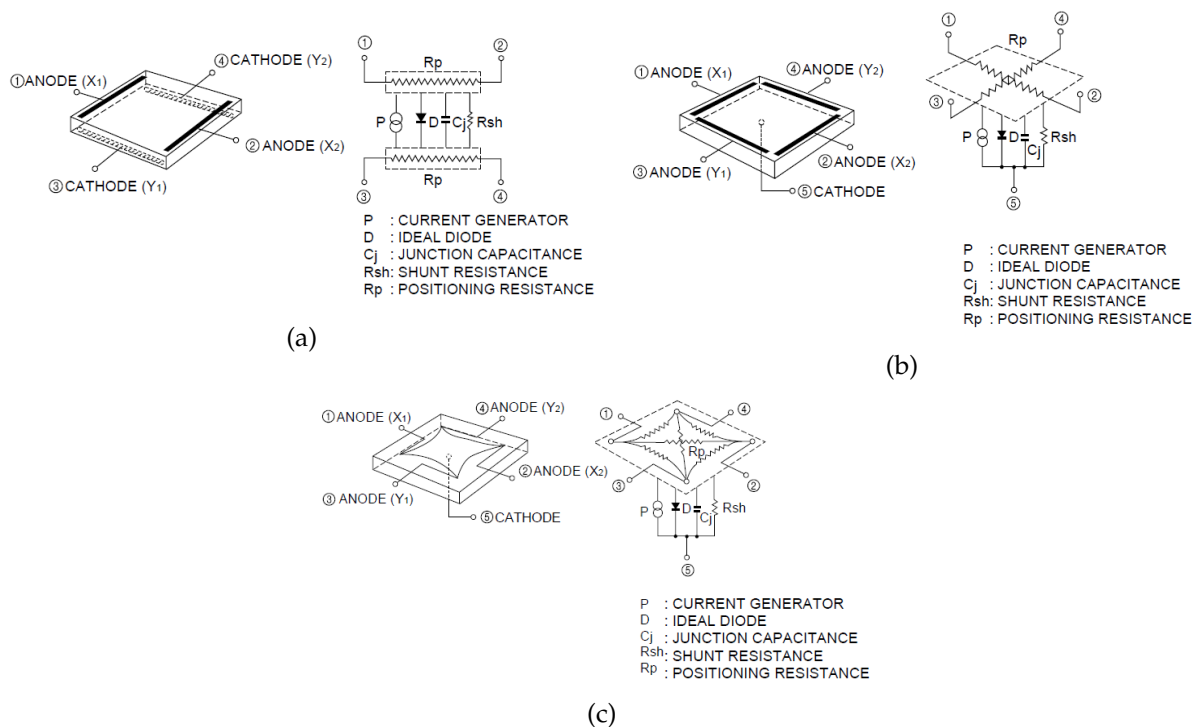


Figura 2.14: Tipos de sensores PSD bidimensionales y circuitos equivalentes; (a) duo-lateral; (b) Tetra-lateral; (c) Pin-cushion; imagenes extraidas de [[Hamamatsu](#), ]

Las aplicaciones de los sensores PSD, se centran en la medición de desplazamientos de objetos o medidas de distancias, ejemplos de aplicaciones se encuentra en [[Katsumura, 1989](#)], donde se desarrolla un sistema de autoenfoco para cámaras,

[Marshall et al., 1993] donde se le da un uso para entrenamiento militar. Otro trabajo se expone en [New, 1974] que lo utilizan para medir desplazamientos y vibraciones en el ámbito industrial, con precisiones por debajo del cm.

Más recientemente, se han desarrollado otras aplicaciones para los sensores PSD, como se muestra en [Nieves et al., 2013] y [Wang et al., 2012], donde se aplican los sensores PSD al control de un brazo robótico, en [Liu et al., 2005] se propone un método para determinar el error en la velocidad angular y al ángulo de un motor rotativo o para medir distancias por medio de visión estéreo como en [Lee et al., 2010] o [Zhou et al., 2009].

En cuanto a los trabajos para el desarrollo de LPS basados en sensores PSD, encontramos [Salomon et al., 2006] que se basa en medidas por AoA, con 4 sensores PSD ubicados por el entorno y un emisor IR abordo de un robot móvil, la determinación de la posición 3-D del objeto la realizada por triangulación. [Park et al., 2006] es otro ejemplo de LPS basados en PSD en el que se propone ubicar un solo sensor PSD en el techo de una habitación y un robot móvil con un emisor IR como agente. Este trabajo está enfocado a compensar los errores dinámicos que se obtienen utilizando un filtro de Kalman para la estimación de la posición. Estos trabajos citados hacen hincapié en las no-linealidades (distorsión) del sensor PSD siendo esté el principal problema para la precisión de las medidas. En [Johnson and Lentz, 2003] se hace un estudio de las no-linealidades de los diferentes tipos de sensores tienen; estas distorsiones son de aproximadamente el 0.3 % del tamaño del sensor PSD para los duo-lateral, del 1 % para los sensores pin-cushion y de 2-3 % para los tetra-lateral.

En [Luo et al., 2013] idean un sistema para la corrección de la distorsión de un sensor PSD duo-lateral. El método escogido ha sido barrer la superficie con un láser que se va desplazando para obtener lo que se muestra en la figura 2.15 y por medio de las ecuaciones 2.1 y 2.2, corregir dicha distorsión.

$$x_{rect} = x - \lambda xy^2 \quad (2.1)$$

$$y_{rect} = y - \gamma yx_{rect}^2 \quad (2.2)$$

donde  $\lambda$  y  $\gamma$ , son los parámetros que modelan la distorsión.

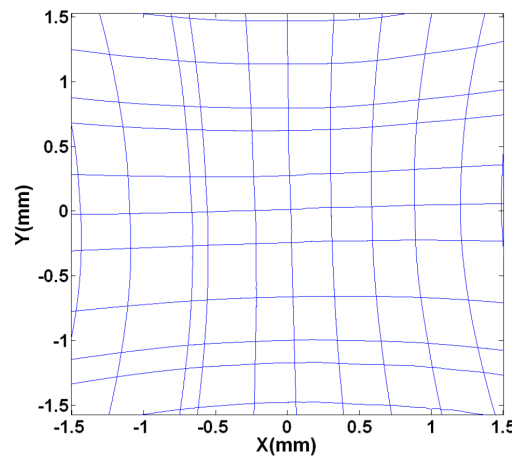


Figura 2.15: Representación de la distorsión de tipo cojín del sensor PSD, [Luo et al., 2013]

Una vez modelada la distorsión realizan una serie de pruebas, la primera consiste en realizar una espiral (figura 2.16.a) y la segunda en círculos (figura 2.16.b).

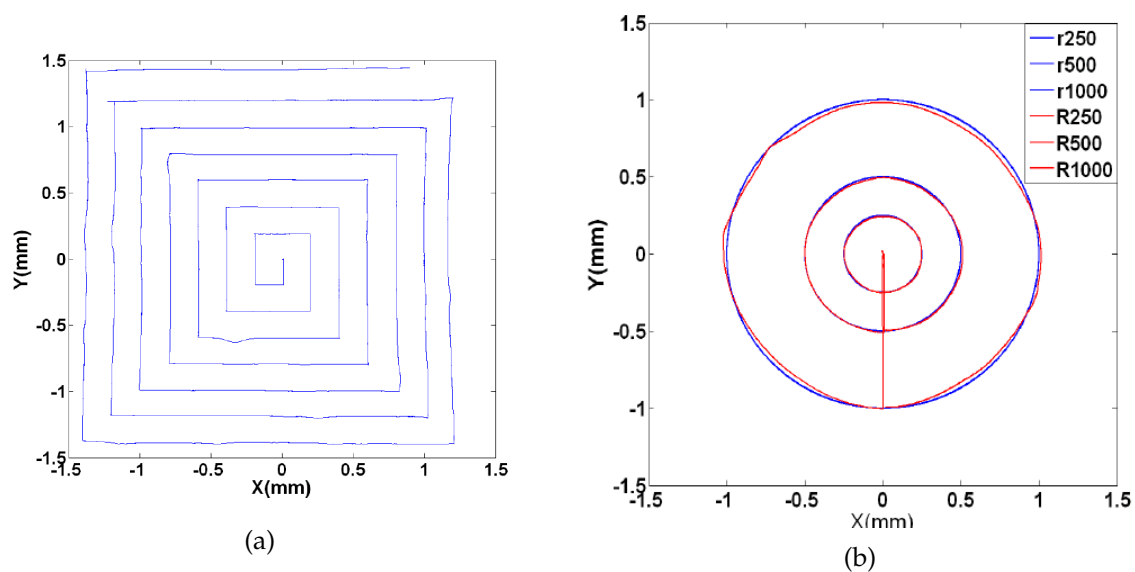


Figura 2.16: Corrección de la distorsión del sensor PSD, [Luo et al., 2013]; (a) Corrección de puntos formando una “espiral” cuadrada; (b) Corrección de puntos formando círculos

Los resultados que obtuvieron en cuanto a los errores del valor del radio de los diferentes círculos de la figura 2.16.b, fueron de  $\pm 2\%$  para el círculo de 0.25 mm, de  $\pm 4\%$  para el círculo de 0.5 mm y de  $\pm 5\%$  para el círculo de 1 mm, demostrando así que es un método válido para la corrección de la distorsión. Sin embargo, en este trabajo se realizaba la distorsión únicamente del sensor PSD, ya que, no tenía una lente acoplada a él. Hay que destacar que en el caso de tener una lente acoplada al sensor PSD, las ecuaciones 2.1 y 2.2 no servirían ya que no tienen en cuenta las distorsiones provocadas por estas, con lo que, en nuestro caso, se deberá considerar esto y utilizar métodos de calibración sí tengan en cuenta los problemas provocados por las ópticas.

## 2.7 Métodos de calibración para cámaras

La calibración de cámaras es un procedimiento que se basa en conocer cómo se forma la imagen 2D de un objeto 3D en el plano imagen y con ese conocimiento poder extraer información métrica de los objetos 3D a partir de las imágenes.

Debido al parecido entre el sensor PSD y los sensores de imagen y a los resultados de los métodos para la calibración de cámaras, se pretende adaptar los métodos de calibración de cámaras, a nuestro sistema. Sin embargo, hay que tener muy presente que a pesar de la similitud, existen algunas diferencias, entre ellas que las cámaras son detectores de array con millones de celdas de recepción (se discretiza el espacio) y el PSD es un detector continuo analógico, y que el sensor PSD presenta distorsión propia, que los sensores de imagen carecen de ella.

En la formación de las imágenes intervienen muchos factores, convirtiéndose en un problema complejo. Sin embargo, existen modelos que simplifican el problema consiguiendo resultados muy buenos, aunque no ideales. El modelo más utilizado del que parten la mayoría de los métodos de calibración es el modelo pin-hole [Renner, 2009], esto es debido a que es un sistema lineal muy simple y que es un buen punto de partida, pero no exacto, ya que no parametriza los efectos provocados por las lentes, la apertura de la lente, etc.

Con el tiempo se han generado múltiples métodos de calibración, los cuales se pueden agrupar con diferentes criterios: métodos lineales *vs* métodos no lineales, métodos que se basan en plantillas de calibración *vs* métodos que se basan en las escenas, métodos basados en una única imagen *vs* métodos con múltiples imágenes, métodos basados en plantillas 3D y métodos basados en plantillas 2D, siendo este último criterio el escogido para clasificar los métodos que se exponen a continuación:

- **Métodos basados en plantillas 3D**

En cuanto a los métodos con plantillas 3D se pueden mencionar los métodos presentados en [Heikkilä and Silvén, 1997] [Tsai, 1987] [Faugeras, 1993], los cuales con una sola imagen son capaces de obtener los parámetros del modelo de cámara. Presentan como desventajas y factores clave que la plantilla de calibración debe estar elaborada de forma precisa, ya que únicamente se utiliza una imagen y cualquier error en la elaboración haría que la calibración fuese errónea. Además la colocación de la plantilla debe estar bien encuadrada para que se vean todas las caras de la plantilla. En la figura 2.17 se muestra una plantilla de calibración utilizada en [Ha, 2009].

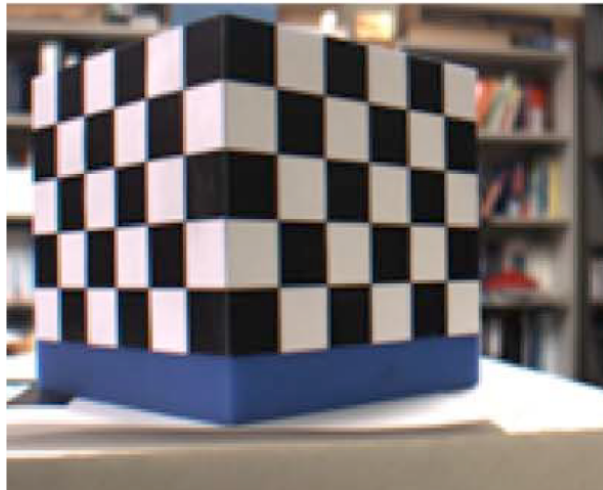


Figura 2.17: Plantilla 3D para calibración de cámaras utilizada en [Ha, 2009]

- **Métodos basados en plantillas 2D**

Entre los métodos basados en plantillas 2D, encontramos los presentados en [Tsai, 1987] [Batista et al., 1998] [Zhang, 2000]. Estos tienen como ventaja que al ser un solo plano se reduce el error en la fabricación de la plantilla. Dentro de estos métodos se puede hacer otra clasificación, los que necesitan una sola imagen [Batista et al., 1998] o los que necesitan varias imágenes [Zhang, 2000] y [Tsai, 1987]. En el caso de Batista tiene el inconveniente que es necesario fijar algunos de los parámetros y a partir de esos parámetros se obtienen los demás por medio de método iterativos, esto hace que la calibración sea tan buena como lo sean los valores iniciales.

En cuanto a la diferencia entre Zhang y Tsai esta reside en que en el método de Tsai son necesarias 2 imágenes y que es necesario colocar el patrón de una forma específica, además de que este método asume que el centro óptico se encuentra en el centro del sensor; en cambio el método Zhang es un método que no requiere precisión en la colocación de la plantilla, siendo un método muy flexible ya que permite utilizar tantas imágenes como se quiera, lo que hace que los resultados mejoren. En la figura 2.18 se muestran el set de imágenes utilizados para la calibración utilizando el método de Zhang .

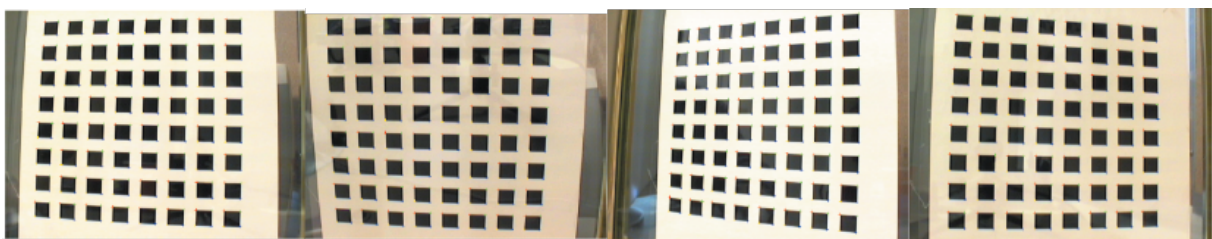


Figura 2.18: Set de imágenes para calibración de cámara utilizadas en [Zhang, 2000]

Para concluir con los métodos de calibración de cámaras, en la tesis de [Isern Gon-

zalez, 2003], se realiza una comparativa exhaustiva de todos los métodos de calibración descritos anteriormente, ante ruidos de un pixel en las imágenes. En la tabla 2.1 se muestra dicha comparativa, estando los datos de la tabla en unidades de pixeles, mostrándose el valor obtenido de la calibración y el valor de la desviación típica entre paréntesis.

Tabla 2.1: Comparativa de los diferentes métodos de calibración, [Isern Gonzalez, 2003]

	$u_o$	$v_o$	$f_u$	$f_v$	$k_1$
Real	255	255	673.58	993.1	0
Tsai	245.33 (8.8)	253.4 (5.5)	662.7 (11.1)	975.8 (17.2)	$-5.1 \cdot 10^{-4}$
Faugeras	254.9(5.6)	255.2(6.7)	674.3(6.7)	994.3(10.4)	-
Zhang	253.3(4.1)	256.9(7.3)	672.3(12.3)	991.2(18.1)	$-6.8 \cdot 10^{-4}$
Batista	256.8(4.2)	256.5(2.1)	676.4(12.6)	995(10.3)	$-1.1 \cdot 10^{-4}$
Heikkilä	254.3(16.9)	251.6(27.3)	673.8(13.5)	993.3(21.4)	$1.3 \cdot 10^{-4}$

En la tabla 2.1 se puede comprobar que los resultados obtenidos por los diferentes métodos han sido similares, a excepción del método de Heikkilä el cual tiene errores muchos más grandes, siendo el método que mejor se comporta ante el ruido en las imágenes el método de Faugeras.

## Capítulo 3

# Descripción y condicionantes de la propuesta.

En este capítulo se presenta una descripción del sistema de posicionamiento propuesto, junto a las partes que lo componen, y cuáles son las características de este sistema que condicionan su desarrollo. Para ello se va a describir en el apartado 3.1 las partes y componentes que integrarán el sistema de posicionamiento, seguidamente en el apartado 3.2 se describen las fuentes de error eléctricas, debidas al sensor PSD y el circuito eléctrico, en el apartado 3.3 los efectos ópticos que afectan a la medida y por último en el apartado 3.4 se presentan varios métodos que pueden ser válidos para la determinación de la posición 3D.

### 3.1 Descripción del LPS

En la figura 3.1 se muestra una representación del sistema el LPS propuesto, el cuál consta de un receptor ubicado en el techo del entorno y un emisor IR a bordo de un robot móvil. El receptor se compone de un sensor PSD con una lente acoplada; el emisor IR ubicado sobre un agente móvil es un LED infrarrojo de alta eficiencia.

En la figura 3.1,  $d$  representa la distancia entre el receptor y el emisor,  $(X_E, Y_E, Z_E)$  es la posición del emisor,  $(X_R, Y_R, Z_R)$  la posición del receptor,  $\alpha_x, \alpha_y$  y  $\theta$  son los ángulos de incidencia y  $S$  la altura a la que está ubicado el receptor respecto al plano por el que se mueve el emisor. Nótese que en este caso se trata de un esquema de posicionamiento ideal en el que los planos del receptor y de movimiento del emisor son coplanares, y por tanto el vector superficie del receptor y el eje axial del emisor son paralelos. Este esquema básico se utiliza para ilustrar el sistema inicialmente. Más adelante se utilizarán esquemas más realistas.



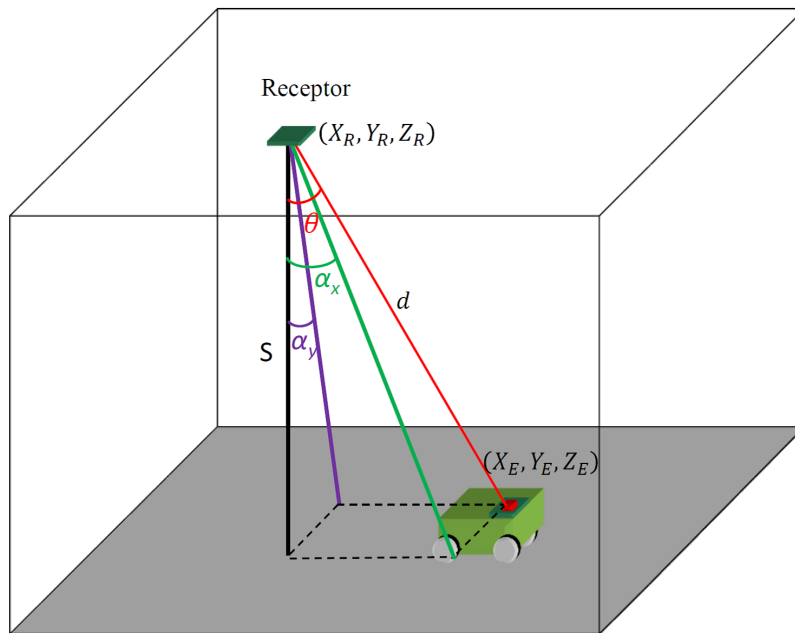


Figura 3.1: Sistema LPS propuesto

En los siguientes apartados se van a describir cada una de las partes de las que se compone el LPS, así como las limitaciones a la hora de la elección de estos dispositivos, según el entorno.

### 3.1.1 Receptor

El receptor se compone del sensor PSD y una lente acoplada al mismo. El funcionamiento del sensor PSD, consiste en calcular el punto de impacto de un haz de luz sobre su superficie, a partir de los valores que se generan en sus cuatro electrodos, siendo el origen de coordenadas el centro del sensor.

Este tipo de sensores son fotodiodos y como tal generan una corriente dependiente de la potencia óptica que incide en su área activa y de la longitud de onda. La diferencia de este sensor con un fotodiodo genérico es que el sensor PSD dispone de 2 o 4 ánodos (según si es unidimensional o bidimensional) y un cátodo común a los anteriores.

En la figura 3.2 se muestra un esquema de la estructura de un PSD unidimensional con 2 ánodos. El principio de funcionamiento de estos sensores es el siguiente: cuando un haz de luz impacta sobre la superficie del sensor PSD este genera una corriente que se reparte entre los electrodos de los ánodos dependiendo de la distancia entre el punto de impacto del haz de luz y los dichos electrodos.

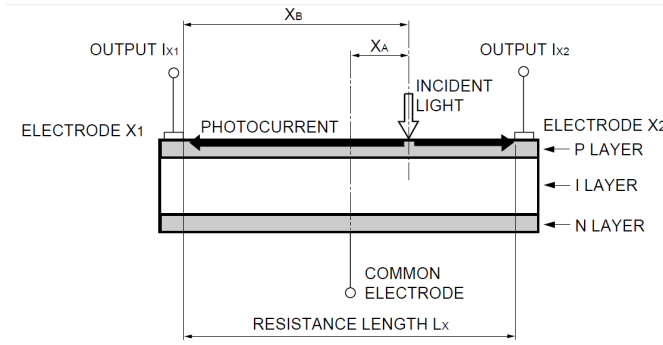


Figura 3.2: Sección de un sensor PSD Unidimensional. Figura cortesía de Hamamatsu

En la figura 3.2,  $X_A$  es el punto de impacto tomando como origen el centro del sensor PSD,  $L_X$  es la longitud del sensor PSD,  $I_{X1}$  e  $I_{X2}$ , son las corrientes de salida del sensor PSD. Así, el calculo del punto de impacto del haz de luz sobre la superficie del sensor PSD respecto a las corrientes y al tamaño del sensor se realiza conforme a la ecuación (3.1).

$$X_A = \frac{L_X}{2} \frac{I_{X2} - I_{X1}}{I_{X1} + I_{X2}} \quad (3.1)$$

En cuanto a los sensores PSD bidimensionales, existen diferentes tipos, duo-lateral, tetra-lateral y pin-cushion, estos últimos tienen como ventajas respecto a los otros, que presentan menores corrientes de oscuridad, mayor velocidad de respuesta y menor distorsión. El circuito equivalente del sensor PSD tipo pin-cushion es el que se muestra en la figura 3.3.

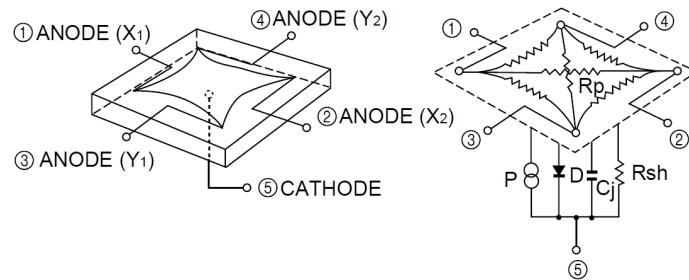


Figura 3.3: Circuito equivalente del sensor PSD pin-cushion. Figura cortesía de Hamamatsu

Se observa que en este caso el sensor PSD tiene 4 ánodos siendo las ecuaciones (3.2) y (3.3) las utilizadas para el cálculo de la posición  $(x, y)$  del punto de impacto del haz de luz sobre el sensor PSD:

$$x = \frac{L_X}{2} \frac{(I_{X2} + I_{Y1}) - (I_{X1} + I_{Y2})}{(I_{X1} + I_{X2} + I_{Y1} + I_{Y2})} \quad (3.2)$$

$$y = \frac{L_Y}{2} \frac{(I_{X2} + I_{Y2}) - (I_{X1} + I_{Y1})}{(I_{X1} + I_{X2} + I_{Y1} + I_{Y2})} \quad (3.3)$$

donde  $I_{X1}$ ,  $I_{X2}$ ,  $I_{Y1}$ , e  $I_{Y2}$  son las corrientes de salida del sensor PSD y  $L_X$  y  $L_Y$  son las dimensiones del sensor.

Las características principales a tener en cuenta de un sensor PSD son las siguientes:

- **Tamaño:** Este parámetro está ligado al campo de visión, cuanto mayor sea el sensor PSD, mayor campo de visión tendrá, además de que lente se le acople, podrá tener mayor área y por tanto la potencia óptica que recibirá será mayor, aumentando el nivel de señal. Como desventaja tenemos que cuando aumenta el tamaño la capacidad interna es mayor y los tiempos de respuesta también, limitando el ancho de banda.
- **Respuesta espectral:** La respuesta espectral es otro factor a tener en cuenta ya que condiciona el emisor IR que se puede utilizar, ya que por ejemplo los sensores PSD de Hamamatsu tienen el pico máximo de sensibilidad a 960 nm, y por tanto el emisor IR que habrá que seleccionar deberá estar lo más cercano a esa longitud de onda, limitando las posibilidades de selección.
- **Corriente de oscuridad:** La corriente de oscuridad está ligada al voltaje de polarización, y al tamaño del sensor PSD, cuanto mayor sea el voltaje de polarización y el tamaño del sensor, mayor será la corriente de oscuridad, con lo que con respecto a este parámetro lo mejor sería un voltaje de polarización bajo.
- **Tiempo de subida:** Este factor varía con el tamaño del sensor y con el punto de polarización, pero en este caso disminuye al aumentar la polarización. Por lo tanto, el voltaje de polarización será un compromiso entre la corriente de oscuridad y el tiempo de subida.

A modo de ejemplo, en la figura 3.4 se muestra la respuesta de los sensores PSD de Hamamatsu a diferentes longitudes de onda.

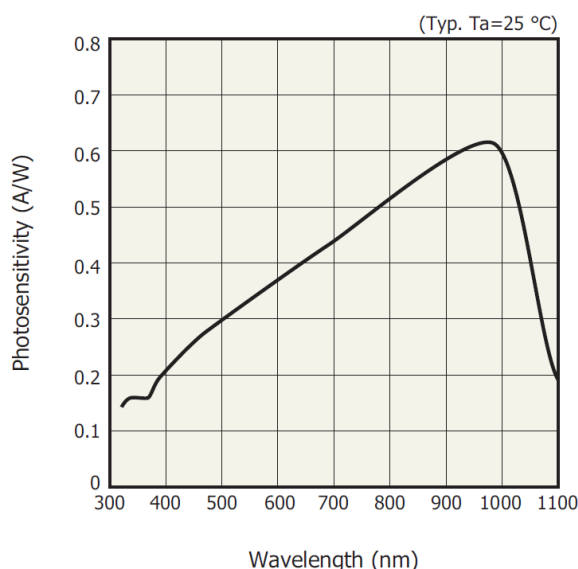


Figura 3.4: Respuesta espectral de sensores de Hamamatsu

En la figura 3.5 se muestra un ejemplo con dos sensores PSD el S5991-01 con un tamaño de 9x9 mm y el S5990-01 con un tamaño de 4x4 mm, donde puede verse cómo se modifica la capacidad de los terminales y la corriente de oscuridad en función de la tensión de polarización. En la figura 3.5.a se puede comprobar que cuanto más pequeño es el sensor menor es la capacidad interna y por tanto menor será el tiempo de respuesta, aumentado el ancho de banda de trabajo, además también se muestra que cuando mayor es el voltaje de polarización menor es la capacidad interna. En la figura 3.5.b se muestra cómo la corriente de oscuridad aumenta con el voltaje de polarización, siendo la corriente de oscuridad menor cuanto más pequeño es el sensor PSD.

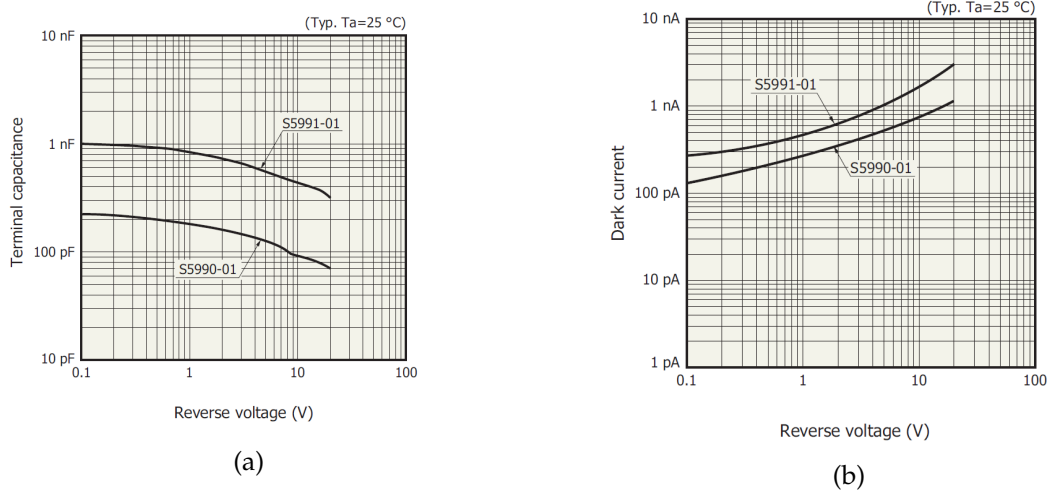


Figura 3.5: Tensión de polarización *vs* (a) Capacidad interna; (b) Corriente de oscuridad

Con lo que, la elección del sensor PSD, dependerá del ancho de banda del sistema, y el campo de visión necesarios.

En cuanto al campo de visión (FoV=Field of View) esté también depende de la lente que se le acople al sensor PSD, según la ecuación (3.4);

$$\text{FoV} = 2 \arctan \left( \frac{d}{2f} \right) \quad (3.4)$$

donde  $d$  es la diagonal del área activa del sensor PSD y  $f$  la distancia focal de la lente. En la figura 3.6 se muestra los ángulos de cobertura dependiendo de la distancia focal de la lente y diferentes tamaños de sensor PSD.

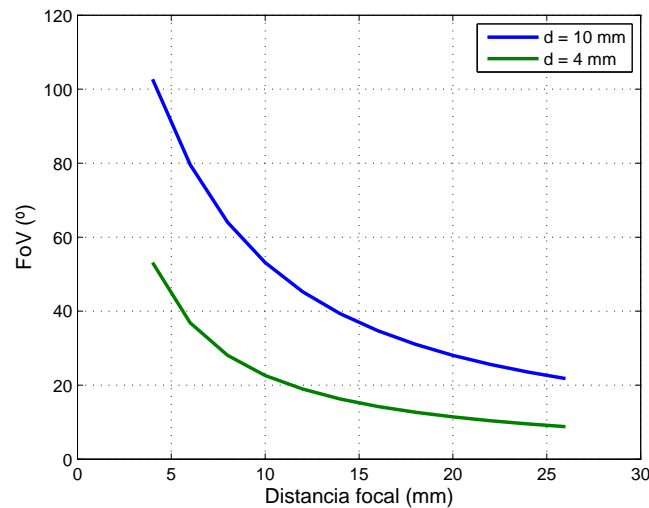


Figura 3.6: Campo de visión en función del tamaño del sensor PSD y de la distancia focal

Otra característica de la lente, es su tamaño, que dependerá del tamaño del sensor PSD, y de la distancia focal, ya que no se fabrican lentes de todos los tamaños y todas las focales, sino que existen restricciones. Una solución podría ser utilizar objetivos diseñados con varias lentes y poder así cumplir los requisitos de área de cobertura y de tamaño de la lente. Sin embargo, como se muestra en la figura 3.7 en el caso más favorable cada lente refleja un 8 % de la luz que recibe, por lo tanto en un caso donde sean un conjunto de 4 lentes, se transmitirá aproximadamente el 70 % de la potencia. Esta pérdida de potencia no se compensa con agrandar el tamaño de la lente y por tanto es recomendable utilizar una única lente.

De igual forma ocurre con los filtros ópticos que también atenúan la energía recibida haciendo disminuir el SNR disponible y por tanto su uso estará condicionado a que la luz de fuentes externas afecte de manera muy considerable, ya que si, por ejemplo, satura la corriente del sensor PSD se debería colocar un filtro óptico, y en el caso de que no sature o aumente muy poco el offset se puede eliminar las aportaciones de estas fuentes externas con filtros digitales.

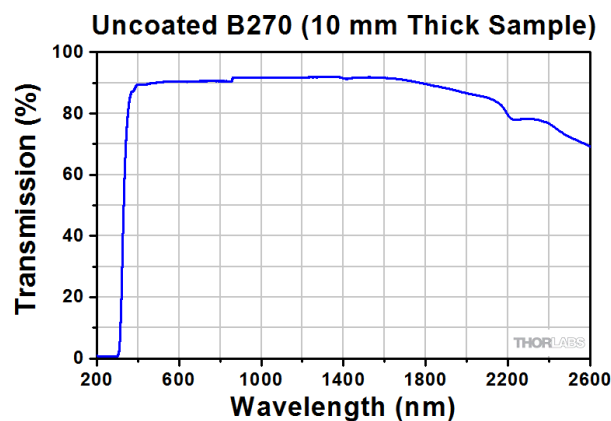


Figura 3.7: Refracción vs longitud de onda. Imagen obtenida de la web de Thorlabs

### 3.1.2 Emisor IR

En cuanto al emisor este debe cumplir una serie de requisitos, que irán condicionados por el sensor PSD y la lente. Estos requisitos son:

- **Longitud de onda:** En cuanto a la longitud de onda de emisión de los LED en el infrarrojo cercano encontramos los emisores IRED más comunes a 850 nm y 940 nm. Según el pico de máxima respuesta espectral del sensor PSD habrá que escoger una u otra longitud de onda. Aunque se podrían utilizar leds a otra longitud de onda, incluso leds visibles, la respuesta espectral a esas longitudes de ondas sería menor y por tanto el SNR de las señales menor.
- **Patrón de emisión:** El patrón de emisión está condicionado por el campo de visión del receptor, siendo lo ideal que el campo de visión del receptor coincidiese con el ángulo mitad del IRED (ángulo al cual la potencia es la mitad que a  $0^\circ$ ). Aquí las limitaciones son menores, ya que, se pueden encontrar IRED con patrones lambertianos en los cuales el ángulo es de  $\pm 60^\circ$  (figura 3.8.a), con un ángulo mitad de  $\pm 45^\circ$  (figura 3.8.b), u otro tipos de patrones más planos; además cabe la posibilidad de poner lentes en los emisores para modificar el patrón.

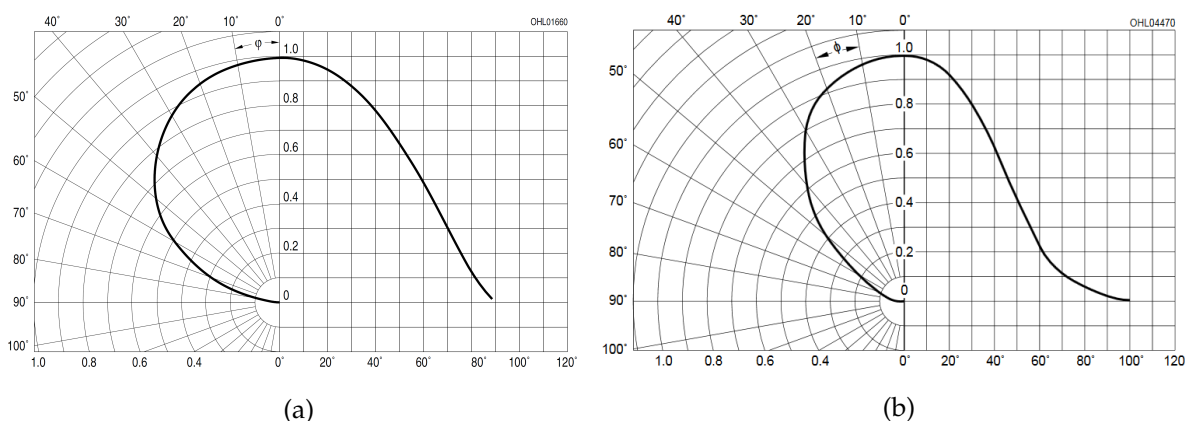


Figura 3.8: Patrón de emisión de dos IRED; (a) Con ángulo mitad  $\pm 60^\circ$ ; (b) Con ángulo mitad  $\pm 45^\circ$

- **Potencia:** Este factor es uno de los más importantes, debido a las distancias que debe recorrer el haz de luz (4-6 metros) y a que la potencia decrece con el cuadrado de la distancia; por ello es necesario que la potencia del emisor sea alta. En caso de que la potencia de emisión no sea suficiente como para tener un SNR adecuado, se pueden escoger emisores con patrones de emisión más cerrados, ya que eso hace que la potencia de emisión se concentre en ángulos más pequeños.
- **Tiempo de subida:** El tiempo de subida de los emisores, no es factor problemático para nuestra aplicación, debido a que hay una gran variedad de emisores IR más rápidos que los sensores PSD.

### 3.1.3 Sistemas con identificación multiagente

El sistema LPS propuesto también debe tener la capacidad de determinar la posición de varios agentes móviles a la vez. Para conseguir esto se pueden utilizar varias técnicas, una de ellas implica que cada agente móvil emita a una frecuencia diferente, y con filtros digitales para separar dichas señales; otro método es mediante CDMA, (Code Division Multiple Access), emitiendo cada emisor una secuencia y utilizando correladores para identificar el agente móvil. La principal limitación común a estas dos técnicas mencionadas es debida a la corriente de saturación del sensor PSD, ya que, las aportaciones de todas las fuentes de emisión de los diferentes agentes podrían hacer que saturase. En cuanto a utilizar diferentes frecuencias, una de las limitaciones reside en el ancho de banda, ya que el número de agentes móviles estará acotado al ancho de banda del sistema, así como, al ancho de banda de los filtros utilizados. En el caso de utilizar CDMA, la limitación reside en que, si se necesita añadir más agentes móviles, las secuencias deben ser más largas, lo que conlleva mayor tiempo de adquisición y de procesado.

### 3.1.4 Consideraciones a tener en cuenta en la elección de la lente y su acoplamiento al PSD

Como ya se ha comentado la elección de la lente debe ir en consecuencia no solo con el área de cobertura y el tamaño del sensor, sino también con el patrón de emisión del LED, ya que como se muestra en la figura 3.9 lo ideal sería que el FoV del receptor coincidiese con el ángulo medio del IRED (figura 3.9.a), para evitar las situaciones que se muestran en la figura 3.9.b y la figura 3.9.c, donde parte del FoV del receptor no se utiliza.

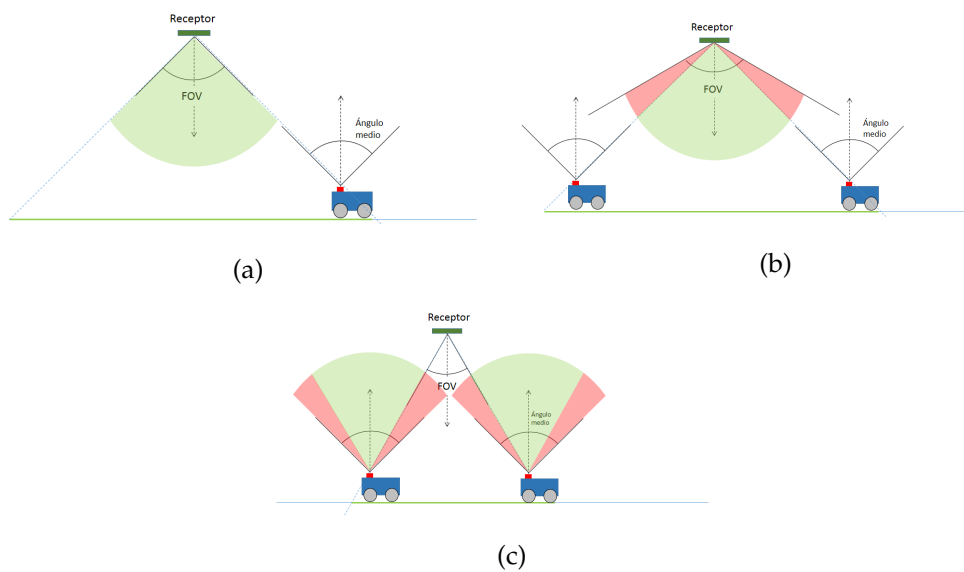


Figura 3.9: FoV del receptor *vs* ángulo mitad del emisor; (a) FoV igual al ángulo mitad; (b) FoV mayor que el ángulo mitad; (c) FoV menor que el ángulo mitad.

Además también hay que tener en cuenta las direcciones de las normales siendo lo ideal que tuviesen la misma dirección, como se muestra en la figura 3.9, porque o sino ocurre lo que se muestra en la figura 3.10 que parte del área activa del sensor PSD no se utilizará.

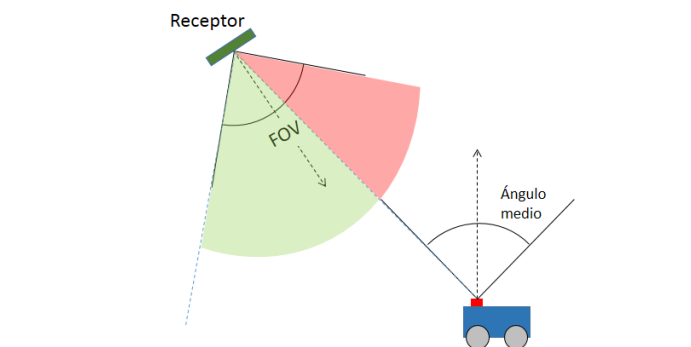


Figura 3.10: Representación de un receptor y un emisor con diferentes orientaciones

## 3.2 Problemas eléctricos debidos al sensor PSD y el circuito acondicionador de señal

Uno de los principales problemas a resolver es la determinación del punto de incidencia en el sensor PSD, ya que este se ve afectado por efectos de las tolerancias de los componentes conectados al sensor PSD, condiciones ambientales, ruidos en las señales, ruido de cuantificación y efectos de los AO; todos estos efectos se analizan a continuación.

### 3.2.1 Desequilibrios en los factores de ganancia debidos a las tolerancias y temperatura

Debido a que las corrientes de salida del sensor PSD en el mejor de los casos son de pocas decenas de  $\mu A$ , es necesario amplificarlas para así poder digitalizarlas de forma más precisa. En la figura 3.11 se muestra el circuito electrónico utilizado para la polarización y amplificación de las señales.



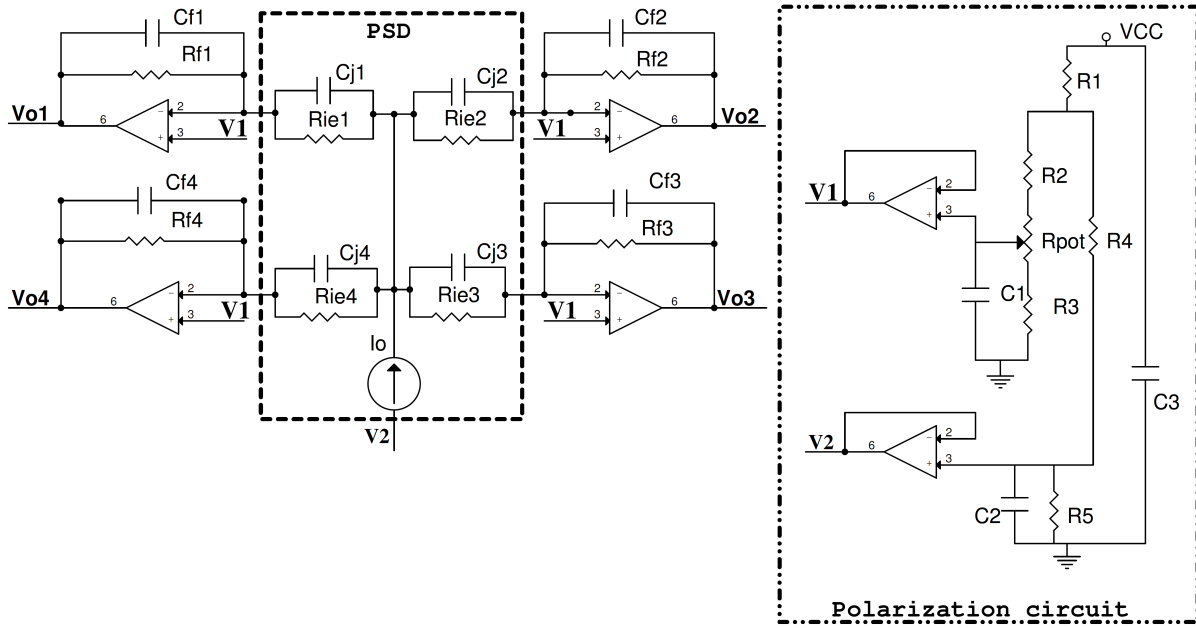


Figura 3.11: Circuito acondicionador de señal y circuito de polarización para un PSD

Al amplificar las corrientes de salida del sensor PSD con operacionales de transimpedancia, las ecuaciones (3.2) y (3.3) vistas anteriormente para el cálculo del punto de impacto, que dependían de las corrientes, se transforman en las ecuaciones (3.5) y (3.6), siendo estas las ecuaciones para el cálculo del punto de impacto.

$$x = \frac{2}{L_x} \frac{\left( \frac{V_{o2}}{k_2(R_{f2}, C_{f2})} + \frac{V_{o3}}{k_3(R_{f3}, C_{f3})} \right) - \left( \frac{V_{o1}}{k_1(R_{f1}, C_{f1})} + \frac{V_{o4}}{k_4(R_{f4}, C_{f4})} \right)}{\left( \frac{V_{o1}}{k_1(R_{f1}, C_{f1})} + \frac{V_{o2}}{k_2(R_{f2}, C_{f2})} + \frac{V_{o3}}{k_3(R_{f3}, C_{f3})} + \frac{V_{o4}}{k_4(R_{f4}, C_{f4})} \right)} \quad (3.5)$$

$$y = \frac{2}{L_y} \frac{\left( \frac{V_{o1}}{k_1(R_{f1}, C_{f1})} + \frac{V_{o2}}{k_2(R_{f2}, C_{f2})} \right) - \left( \frac{V_{o3}}{k_3(R_{f3}, C_{f3})} + \frac{V_{o4}}{k_4(R_{f4}, C_{f4})} \right)}{\left( \frac{V_{o1}}{k_1(R_{f1}, C_{f1})} + \frac{V_{o2}}{k_2(R_{f2}, C_{f2})} + \frac{V_{o3}}{k_3(R_{f3}, C_{f3})} + \frac{V_{o4}}{k_4(R_{f4}, C_{f4})} \right)} \quad (3.6)$$

donde  $\frac{V_{o1}}{k_1(R_{f1}, C_{f1})} = I_{x1}$ ,  $\frac{V_{o2}}{k_2(R_{f2}, C_{f2})} = I_{x2}$ ,  $\frac{V_{o3}}{k_3(R_{f3}, C_{f3})} = I_{y1}$  y  $\frac{V_{o4}}{k_4(R_{f4}, C_{f4})} = I_{y2}$ , siendo  $k_i$ ,  $i=\{1,2,3,4\}$  los factores de ganancia de cada canal,  $V_{oi}$  el voltaje de salida de los amplificadores, y  $R_{fi}$  y  $C_{fi}$  la resistencia y el condensador de retroalimentación.

Como se puede observar el punto de impacto obtenido no solo depende de la señal, sino que también se ve afectado por el factor de ganancia de los amplificadores, que depende de los valores de la resistencia y el condensador de retroalimentación y los valores de estos varían según la tolerancia y la temperatura. De estos dos factores de error (tolerancias y temperaturas), el error debido a las tolerancias se mantiene constante en el tiempo, es decir, es un error sistemático que podrá ser corregido como se mostrará en el capítulo 4, sin embargo el factor debido a la temperatura es variable, este factor se podría corregir utilizando algún sensor de temperatura, como termopares,

pt100, etc. aunque como se explicará en el capítulo 4, el error debido a este factor se puede reducir de forma que el efecto sea mínimo.

### 3.2.2 Ruido eléctrico en las señales a la salida del sensor PSD

Otras fuentes de error debidas al circuito eléctrico y al sensor PSD, son los ruidos en las señales, estos ruidos hacen que el SNR de las señales disminuya produciendo errores en el cálculo del punto de impacto.

Para el análisis de los ruidos nos vamos a basar en el circuito de la figura 3.12 siendo este el circuito equivalente para una salida del sensor PSD, en la cual se muestran los ruidos existentes, como son los ruidos producidos por el sensor PSD: ruido shot o de disparo, característicos de los fotodiodos, debido a las corrientes que genera el sensor PSD ( $I_o$  y  $I_D$ ), ruidos térmicos producidos por las resistencias retroalimentación e interna del sensor PSD, y por último los ruidos de los amplificadores operacionales ( $i_n$  y  $e_n$ ).

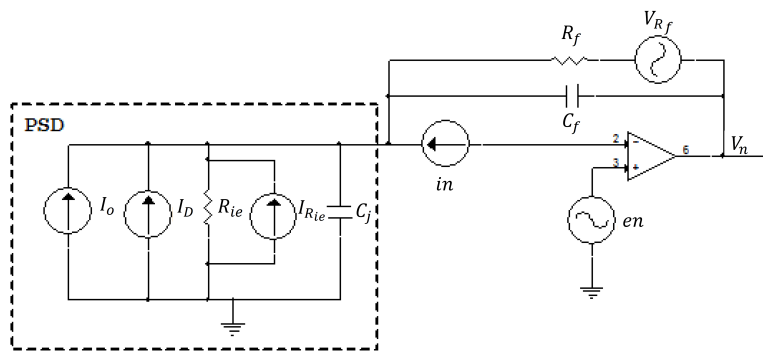


Figura 3.12: Circuito eléctrico equivalente para un canal del PSD

En la figura 3.12,  $I_o$  representa la fotocorriente generada por el sensor,  $I_D$  la corriente de oscuridad,  $R_{ie}$  la resistencia interna del sensor,  $C_j$  la capacitancia interna del sensor PSD,  $R_f$  y  $C_f$  la resistencia y condensador de retroalimentación respectivamente,  $e_n$  el voltaje de ruido equivalente del AO,  $i_n$  la corriente de ruido equivalente del AO y  $V_n$  el ruido total de salida.

La expresión del ruido shot es la siguiente:

$$V_s = R_f / C_f \cdot \sqrt{2q(I_o + I_D) \text{ BW}} \quad (3.7)$$

donde  $q$  es la carga del electrón y BW el ancho de banda (Hz).

El ruido térmico o Johnson es generado por las resistencias  $R_{ie}$  y  $R_f$  siendo las expresiones:

$$V_{R_{ie}} = R_f // C_f \cdot \sqrt{\frac{4KT}{R_{ie}} BW} \quad (3.8)$$

$$V_{R_f} = R_f // C_f \cdot \sqrt{\frac{4KT}{R_f} BW} \quad (3.9)$$

donde  $K$  es la constante de Boltzmann y  $T$  es la temperatura absoluta. Y por último tenemos los ruidos de los amplificadores:

$$V_{en} = \left(1 + \frac{R_f // C_f}{R_{ie} // C_j}\right) en \sqrt{BW} \quad (3.10)$$

$$V_{in} = R_{fin} \sqrt{BW} \quad (3.11)$$

La expresión final de la ecuación (3.12) es la suma total de todos los ruidos:

$$V_n = \sqrt{V_s^2 + V_{R_{ie}}^2 + V_{R_f}^2 + V_{en} + V_{in}} \quad (3.12)$$

Esta fuente de error se modela como un parámetro ( $\sigma_i$ ) que se suma a las señales de salida del sensor PSD, siendo las ecuaciones (3.13) y (3.14) las resultantes para el cálculo del punto de impacto, teniendo en cuenta los desequilibrios de los factores de ganancia y el ruido eléctrico.

$$x = \frac{2}{L_x} \frac{(S_2 + \sigma_2 + S_3 + \sigma_3) - (S_1 + \sigma_1 + S_4 + \sigma_4)}{(S_1 + \sigma_1 + S_2 + \sigma_2 + S_3 + \sigma_3 + S_4 + \sigma_4)} \quad (3.13)$$

$$y = \frac{2}{L_y} \frac{(S_1 + \sigma_1 + S_2 + \sigma_2) - (S_3 + \sigma_3 + S_4 + \sigma_4)}{(S_1 + \sigma_1 + S_2 + \sigma_2 + S_3 + \sigma_3 + S_4 + \sigma_4)} \quad (3.14)$$

donde,  $S_i$  es  $\frac{V_{oi}}{k_i(R_{fi}, C_{fi})}$ .

Esta factor de error es aleatorio con lo que no se puede eliminar, pero el error en el punto de impacto se podrá reducir haciendo uso de filtros digitales y utilizando tiempos de adquisición mayores.

### 3.2.3 Ruido de cuantificación

Otra fuente de error es la producida por la digitalización de las señales, este ruido depende del ADC seleccionado (número de bits, frecuencia de muestreo, SPAN y la amplitud de la señal de entrada). La ecuación (3.15) establece el SNR de cuantificación.

$$SNR_Q = 10 \cdot \log \left( \frac{P_x}{P_n} \right) \quad (3.15)$$

$P_x$  es la potencia de la señal y  $P_n$  la potencia de ruido de cuantificación.

$P_x$  y  $P_n$  se modelan como se muestra en las ecuaciones (3.16) y (3.17) respectivamente, siendo (3.16) la potencia de una señal sinusoidal de amplitud  $\frac{V_{pp}}{2}$ .

$$P_x = \frac{V_{pp}^2}{8} \quad (3.16)$$

$$P_n = \frac{\sigma_Q^2}{f_s / (2BW)} \quad (3.17)$$

donde  $\sigma_Q^2$  es la variancia del ruido total de cuantificación,  $f_s$  la frecuencia de muestreo y BW el ancho de banda de interés.  $\sigma_Q^2$  se modela como la variancia de una distribución de probabilidad uniforme con limites  $[-q/2, q/2]$ , donde  $q$  es la resolución del ADC que es definida por el SPAN entre el rango de valores que puede digitalizar el ADC, es decir, el número de bits del ADC. Por lo tanto  $P_n$  queda como:

$$P_n = \frac{\frac{SPAN}{12 \cdot 2^{2n}}}{f_s / (2BW)} \quad (3.18)$$

Sustituyendo  $P_x$  y  $P_n$  en (3.15) obtenemos la ecuación (3.19) que relaciona el  $SNR_Q$  con: el número de bits, fondo de escala de entrada y frecuencia de muestreo del ADC, así como con la amplitud de la señal a digitalizar.

$$SNR_Q = 10\log\left(\frac{3}{2}\right) + 10\log(4^n) + 10\log\left(\frac{V_{pp}^2}{SPAN}\right) + 10\log\left(\frac{f_s}{2BW}\right) \quad (3.19)$$

En la figura 3.13.a se muestra el valor del  $SNR_Q$  (dB) en relación con número de bits del conversor, con  $V_{pp} = SPAN$  y  $f_s = 2BW$ . Hay que remarcar que este ancho de banda representa un peor caso posible. Dado que las frecuencias de trabajo no son muy elevadas, es factible trabajar con frecuencias de muestreo 10 veces superiores o más, con lo que los resultados serían los mostrados en la figura 3.13.b.

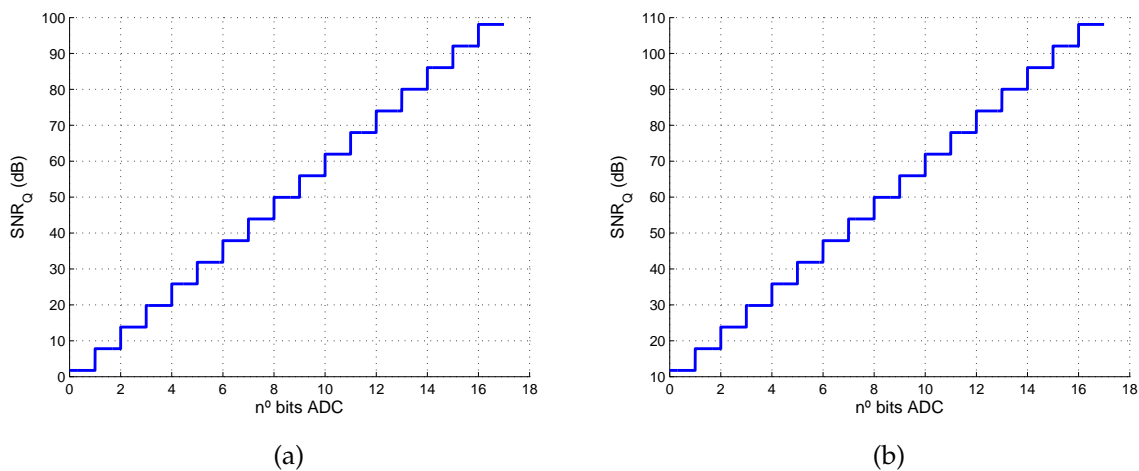


Figura 3.13: SNR de cuantificación en relación al número de bits del ADC con  $V_{pp} = SPAN$ ; (a)  $f_s = 2BW$ ; (b)  $f_s = 20BW$

A partir de la ecuación (3.19), podemos calcular los parámetros del ADC para que cumpla que el SNR de cuantificación sea lo suficientemente grande como para que sea

despreciable frente a otros factores de error en el cálculo del punto de incidencia.

### 3.2.4 Efectos no ideales de los amplificadores operacionales

Por último, están los efectos relacionados con el funcionamiento no ideal de los amplificadores operacionales en configuración de transimpedancia, como son la impedancia de entrada, tensión y corrientes de offset en la entrada, corrientes de polarización, razón de rechazo de la tensión de alimentación (PSRR) y slew-rate.

Aquellos efectos que afectan al offset de las señales, como son las corrientes de polarización, y la tensión y corriente de offset, se pueden eliminar utilizando filtros digitales paso-alto o paso-banda. También es posible eliminarlos mediante hardware añadiendo un filtro paso-alto. El único problema que se puede dar debido a estos efectos es que el offset llegase a saturar, es por eso que lo aconsejable es que el amplificador sea un amplificador con corrientes de polarización, y tensión y corriente de offset bajas.

En lo que a impedancia de entrada se refiere, es importante escoger un amplificador con baja capacidad de entrada, debido a que esta puede hacer que el sistema sea inestable. De todas formas, esta capacidad se puede compensar añadiendo un condensador feedback, haciendo el circuito estable, aunque el ancho de banda se verá reducido.

Una limitación del operacional no-ideal es el slew-rate que determina la frecuencia a la cual el amplificador operacional puede seguir una señal a su entrada, es decir, que a la salida del amplificador se obtenga la señal de la entrada amplificada sin distorsión. En el caso de una señal sinusoidal el amplificador debe tener un slew-rate que cumpla (3.20), donde  $f_{\max}$  es la frecuencia máxima de trabajo y  $V_P$  es la amplitud de la señal.

$$\text{slew - rate} \geq f_{\max} 2\pi V_P \quad (3.20)$$

Otro aspecto a considerar es el PSRR (razón de rechazo a la fuente de alimentación). Debido a que las fuentes de alimentación presentan fluctuaciones en el voltaje, el punto de operación del amplificador cambia y por tanto la señal amplificada se verá afectada según (3.21). Este efecto se puede reducir añadiendo un regulador de tensión entre la fuente de alimentación y los amplificadores que elimine las fluctuaciones de la fuente. Esto es especialmente importante en el caso de utilizar fuentes conmutadas ya que estas fuentes suelen trabajar a decenas de kHz que es la ventana de trabajo de los sensores PSD.

$$V_{\text{ripple}_{\text{out}}} = \frac{V_{\text{ripple}_{\text{in}}}}{\text{PSRR}} \quad (3.21)$$

### 3.3 Problemas y restricciones debidos del sistema óptico

Como se comentó en el capítulo de introducción, el objetivo principal es determinar la posición 3-D de un emisor IR abordo de un robot móvil con un solo receptor, una de las medidas necesarias para lograr dicho objetivo es medir el ángulo de incidencia.

La determinación del ángulo de incidencia de un haz de luz que impacta sobre la superficie de un sensor PSD se realiza por métodos geométricos, basádonos en el principio ilustrado en la figura 3.14. Se puede comprobar que conociendo el punto de impacto  $(x, y)$  y la distancia focal ( $f$ ) sería posible calcular los ángulos de incidencia del haz de luz relativo al eje  $x$  según (3.22). Para el eje  $y$  se calcularía de igual forma pero sustituyendo la coordenada  $x$  por la coordenada  $y$ .

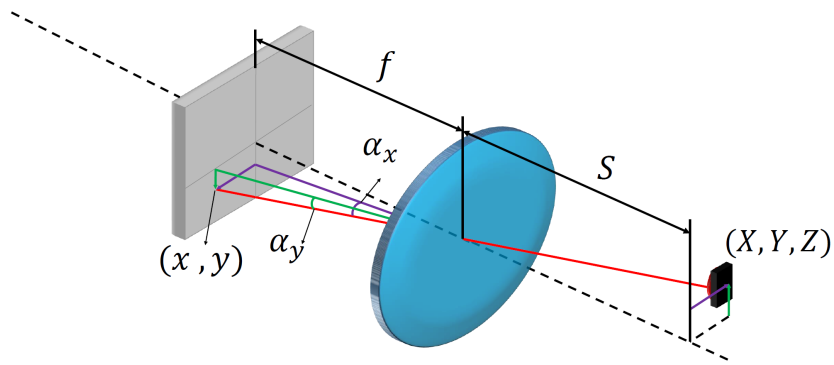


Figura 3.14: Esquema representativo del sistema óptico

En la figura 3.14,  $(x, y)$  es la coordenada de impacto,  $f$  la distancia focal,  $S$  la distancia del sistema óptico con respecto al LED IR y  $(X, Y, Z)$  el punto donde está localizado el LED IR.

$$\alpha_x = \text{atan} \frac{x}{f} \quad (3.22)$$

El principal problema de las lentes son las aberraciones (distorsiones), que desvían el haz de luz haciendo que el punto de impacto de este haz no se produzca en línea con el trayecto que sigue desde el emisor hasta la lente y por consiguiente si este efecto no es corregido el cálculo del ángulo de incidencia, no será el correcto.

En cuanto a las distorsiones las más significativas son las distorsiones radiales y las distorsiones tangenciales. Las distorsiones radiales suelen ser las que más error introducen y se deben a la curvatura de la lente, estas pueden ser de dos tipos, cojín o barril, en la figuras 3.15.a y 3.15.b se muestran estos dos tipos de distorsión radial.

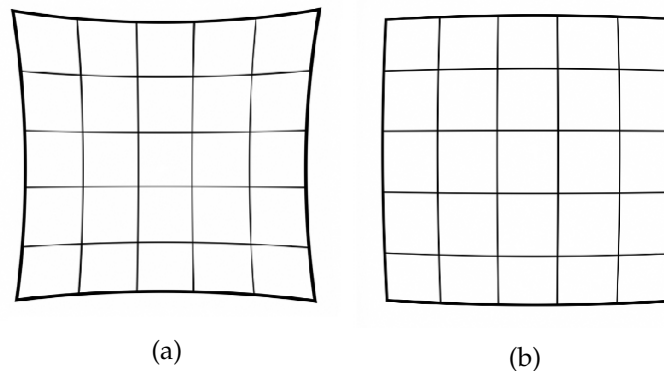


Figura 3.15: Distorsión radial; (a) tipo cojín; (b) tipo barril

En cuanto a la distorsión tangencial se debe al acople de la lente con el sensor PSD y debido a que este acople se realiza manualmente son posibles las holguras y asimetrías (por pequeñas que sean) y habrá que tenerla en cuenta a la hora de modelar y calibrar el sistema.

Otro problema es la distorsión del propio sensor PSD. Aunque este es un problema eléctrico, dado su semejanza a la distorsión radial óptica, se va a tratar desde el punto de vista óptico conjuntamente con el resto de distorsiones.

El nivel de distorsión del sensor PSD, vendrá determinado por el tamaño del sensor PSD y por el tipo de este, siendo del 1 % para los pincushion [Johnson and Lentz, 2003].

Otro problema añadido al de las distorsiones es debido a que el origen de la distorsión de la lente se produce en el centro óptico y la distorsión del sensor PSD en el centro geométrico del sensor y estos centros no tienen por qué coincidir; es más, seguramente no coincidan. Esto produce que la distorsión total, no sea simétrica, impidiendo así utilizar los modelos existentes para cámaras.

Para corregir estos efectos de naturaleza óptica en el capítulo 5 se describe el modelo matemático del sistema, así como un método de calibración para obtener los parámetros del correspondiente modelo.

### 3.4 Propuestas para la determinación de la posición 3D

Conociendo el ángulo de incidencia, quedaría por conocer la distancia entre emisor y receptor de forma que se pueda determinar la posición 3-D del agente móvil. En este apartado se van a introducir varias propuestas que podrían ser utilizadas para obtener la posición 3-D del robot móvil, utilizando diferentes técnicas.

### 3.4.1 Obtención del plano por el que se mueve el agente móvil

La primera de ellas y más fácil de llevar a cabo es conocer el plano por el que se mueve el robot móvil (dentro del FoV del sistema sensorial). Por lo tanto, como se muestra en la figura 3.16, el plano  $\pi$ , se va a calcular utilizando como referencia la posición del receptor el sistema de referencia.

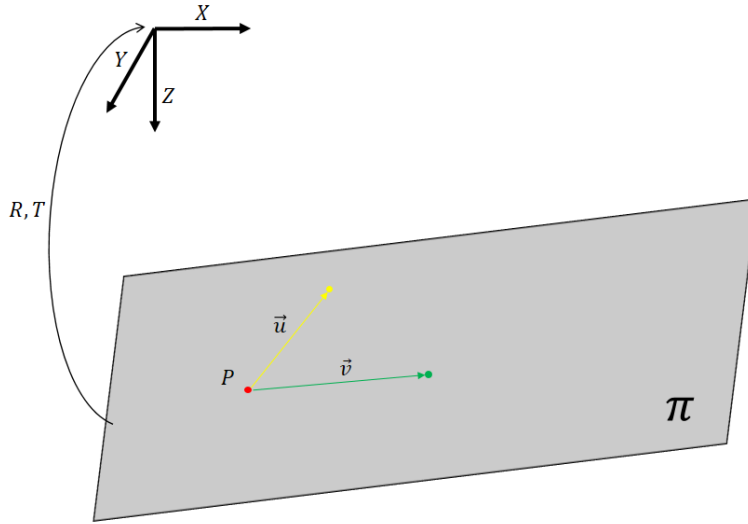


Figura 3.16: Representación gráfica del procedimiento de calibración del plano

donde  $X, Y$  y  $Z$  es el sistema de referencia del entorno,  $P$  un punto que pertenece al plano  $\pi$ ,  $\vec{u}$  y  $\vec{v}$  dos vectores que también pertenecen al plano y  $R$  y  $T$ , que son la relación entre el plano y el receptor (sistema referencia). Por lo tanto, siendo la ecuación del plano, la siguiente:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (3.23)$$

donde  $A, B, C$  y  $D$  son los parámetros que modelan el plano y  $(x, y, z)$  puntos que pertenecen a ese plano.

Para la obtención de los parámetros ( $A, B, C$  y  $D$ ) es necesario conocer un punto ( $P$ ) en el plano y dos vectores ( $\vec{u}$ ) y ( $\vec{v}$ ), o lo que es lo mismo 3 puntos que pertenezcan al mismo plano.

$$P = (x_0, y_0, z_0) \quad \vec{u} = (u_1, u_2, u_3) \quad \vec{v} = (v_1, v_2, v_3)$$

Conocidos el punto y los dos vectores, los parámetros de la ecuación (3.23) son calculados del siguiente modo:

$$A = \begin{vmatrix} u_2 & u_3 \\ v_2 & v_3 \end{vmatrix} \quad B = - \begin{vmatrix} u_1 & u_3 \\ v_1 & v_3 \end{vmatrix} \quad C = \begin{vmatrix} u_1 & u_2 \\ v_1 & v_2 \end{vmatrix} \quad D = -Ax_0 - By_0 - Cz_0 \quad (3.24)$$



Como se ha comentado es necesario conocer la posición de 3 puntos en el entorno que pertenezcan al plano de movimiento del agente móvil, el error en el cálculo de la posición de esos 3 puntos, afectará al cálculo del plano, lo que se traducirá en un error en la posición del agente móvil, que habrá que añadir al error debido al cálculo del ángulo de incidencia. Para minimizar este efecto, se puede utilizar un sistema sobredimensionado para el cálculo del plano, basado en más de 3 puntos.

### 3.4.2 Determinación de la posición 3D por medio de RSS y marcas

Otro modo sería utilizando el nivel de energía óptica que recibe el sensor PSD; este método para el posicionamiento del agente móvil tiene la problemática de que la potencia de emisión no es estable con la temperatura y además sufre derivas con la polarización y con el tiempo. En este apartado como en los siguientes, donde se utiliza el nivel de potencia recibida, se van a describir diferentes modos de obtener el valor de la potencia de emisión cada cierto tiempo, ya que esta no tiene variaciones importantes en cortos periodos de tiempos.

Partiendo de la figura 3.17, donde  $A_R$  es el área del receptor,  $\theta$  el ángulo de incidencia,  $\phi$  el ángulo de emisión,  $n$  el parámetro que modela el patrón de emisión del LED,  $P_T$  la potencia de emisión y  $d$  la distancia entre emisor y receptor, se obtiene (3.25) que modela el comportamiento de la luz óptica recibida en una superficie plana.

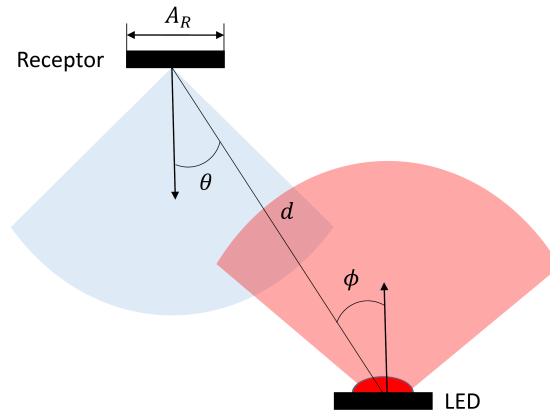


Figura 3.17: Parámetros geométricos que intervienen en la emisión y recepción de luz

$$P_R = \frac{A_r(n+1)}{2\pi d^2} \cos(\theta) \cos^n(\phi) P_T \quad (3.25)$$

De estos parámetros  $A_R$  y  $n$ , son constantes y los demás parámetros  $\theta$ ,  $\phi$ ,  $d$  y  $P_T$  son variables. Los parámetros  $\theta$ ,  $\phi$  y  $d$ , dependen de la posición del emisor IR con respecto al receptor, y  $P_T$  depende de la corriente que atraviese el diodo y la temperatura. Esta variación de flujo radiante se muestra en las características dadas por el fabricante.

El primer método y más sencillo para obtener la potencia de emisión es suponer

conocida las variables  $\theta$ ,  $\phi$  y  $d$  en algunas posiciones del entorno (marcas), y siempre que el agente móvil pase por alguna de ellas, obtener  $P_T$ . Una vez obtenido  $P_T$ , se puede hacer el seguimiento del emisor, ya que suponiendo la potencia de emisión estable, el ángulo de incidencia se obtiene a partir del impacto del haz en el sensor PSD y por tanto quedaría por conocer el ángulo de emisión y la distancia. En un principio se va a suponer que el ángulo de emisión es igual al ángulo de incidencia, es decir, que las normales del receptor y el emisor tienen misma dirección, como esto no será así en el capítulo 6 se analizará que error supone esta suposición.

### 3.4.3 Determinación de la posición 3D por medio de RSS y recepción estéreo

En la misma línea que en el anterior caso, la idea es realizar el seguimiento por potencia recibida. Sin embargo, en este caso la calibración de la potencia recibida se realiza por medio de la recepción de la señal en dos detectores PSD simultáneamente. Así por ejemplo, y debido a que en la mayoría de los entornos será necesario utilizar más de un sensor PSD para ubicar al agente móvil, se pueden disponer zonas que tendrán cobertura de dos sensores PSD y zonas con únicamente un sensor. En la figura 3.18 se ilustra una zona cubierta por dos sensores (zona morada) y también zonas cubiertas por un único sensor (zona azul, roja y verde). En este caso cuando el agente se encuentre en una zona cubierta por dos receptores mediante triangulación (equivalente a lo que sería visión estéreo con cámaras) se puede calcular la posición 3-D y a partir de ella calibrar la potencia de emisión.

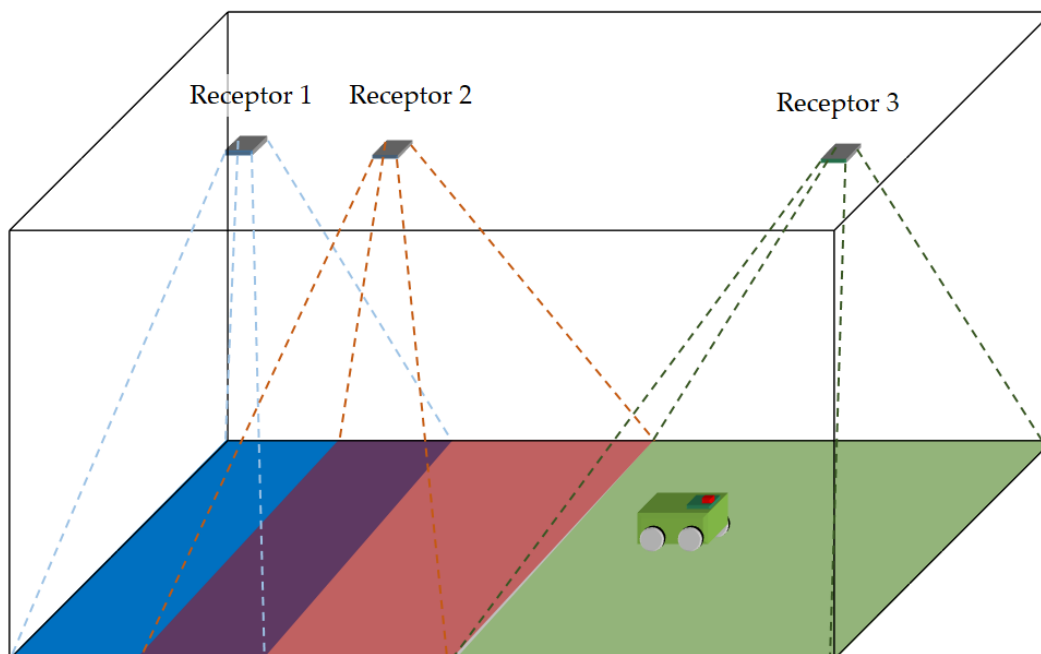


Figura 3.18: Escenario donde hay zonas cubiertas por dos sensores PSD y zonas cubiertas por un solo sensor PSD

Los pasos a seguir en este caso son los siguientes:

- Calibración independiente de cada receptor para obtener sus parámetros intrínsecos
- Calibración estéreo del conjunto de dos receptores para la obtención de la matriz rotación y el vector traslación entre ellos (en el ejemplo de la figura 3.18, la relación entre el receptor 1 y 2).
- Trazar la recta desde el punto de impacto en cada receptor y obtener el punto de corte entre ellas que nos proporcionará la posición 3-D del emisor.
- Una vez conocido el punto de corte, se tiene la distancia entre el emisor y cada uno de los receptores, con lo que se puede calibrar la potencia transmitida y a partir de ese momento hacer el seguimiento con la potencia recibida.

#### 3.4.4 Determinación de la posición 3D por medio de RSS y PDoA

También existe la opción de determinar la posición 3D de agente móvil fusionando las técnicas de potencia recibida y de diferencia de fase de llegada, utilizando un único sensor PSD.

Basándonos en la figura 3.19, la idea es obtener la diferencia de distancia entre dos posiciones por medio de la diferencia de fase de llegada de la señal recibida en dos posiciones diferentes, y seguidamente con la diferencia de potencias recibidas entre las dos posiciones obtener la distancia absoluta (asumiendo que la potencia no varía en cortos periodos de tiempo). A partir de la distancia y del punto del impacto se podrá obtener la posición 3D del agente.

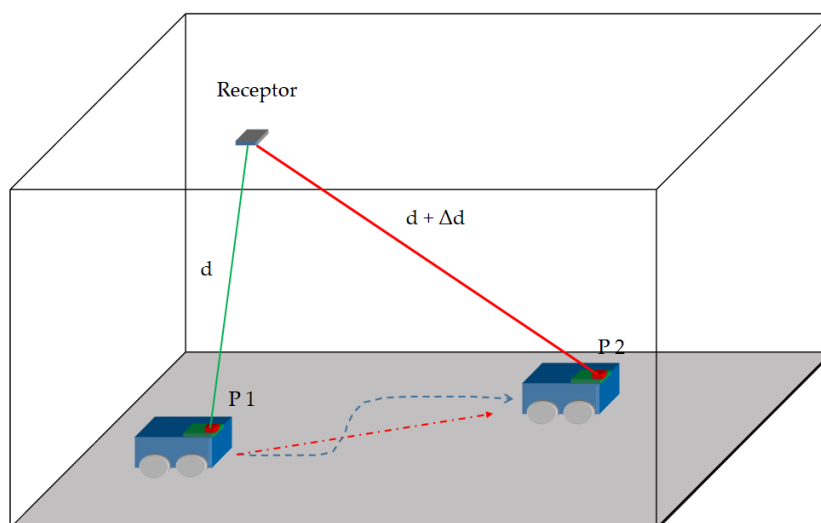


Figura 3.19: Determinación de la distancia entre emisor y receptor

El proceso sería como sigue: Partiendo de una posición ( $P_1$ ), en la cual se obtiene la potencia recibida en ese punto, el agente se desplazará a otra posición ( $P_2$ ) y por medio del cociente entre las potencias recibidas se obtendrá la distancia. Siendo las ecuaciones (3.26) y (3.27) las potencias recibidas en las posiciones 1 y 2 respectivamente.

$$P_{R1} = \frac{A_r(n+1)}{2\pi d_1^2} \cos(\theta_1) \cos^n(\phi_1) P_T \quad (3.26)$$

$$P_{R2} = \frac{A_r(n+1)}{2\pi d_2^2} \cos(\theta_2) \cos^n(\phi_2) P_T \quad (3.27)$$

El cociente queda del siguiente modo:

$$\frac{P_{R1}}{P_{R2}} = \frac{d_2^2 \cos(\theta_1) \cos^n(\phi_1)}{d_1^2 \cos(\theta_2) \cos^n(\phi_2)} \quad (3.28)$$

Como  $d_2 = d_1 + \Delta d$ , desarrollando (3.28) tenemos que:

$$d_1^2 \left( 1 - \frac{P_{R1} \cos(\theta_2) \cos^n(\phi_2)}{P_{R2} \cos(\theta_1) \cos^n(\phi_1)} \right) + \Delta d^2 + 2d_1 \Delta d = 0 \quad (3.29)$$

De todas las variables, únicamente son desconocidas  $d_1$  y  $\Delta d$ . La propuesta es obtener la diferencia de distancias ( $\Delta d$ ) por la diferencia de fase de llegada, que en caso de trabajar con señales sinusoidales se puede obtener con un demodulador I/Q o en caso de trabajar con secuencias con un delay-locked loop (DLL).

En este caso la mayor problemática es medir la diferencia de fase de llegada con precisión, debido a que la fase de las señales se realiza en tiempos diferentes, es decir, en el caso de sistemas que utilizan medidas diferenciales, la adquisición de las señales se realiza de forma simultánea, en cambio al hacerlo en dos tiempos diferentes, debido a las derivas y ruidos de los osciladores los errores en la diferencia de fase son mayores. Aquí hay que hacer hincapié en que la estabilidad del oscilador y el jitter son de gran importancia para la obtención de la medida, como se comentará en el capítulo 6.

### 3.5 Resumen y conclusiones

En este capítulo se ha presentado la descripción del sistema propuesto para el desarrollo de un LPS, que se basa en un sensor PSD con una lente acoplada, ubicado en el techo y un emisor IR sobre un agente móvil. Las características y restricciones analizadas para el PSD han sido: tamaño, respuesta espectral, corriente de oscuridad y tiempo de respuestas. Todas estas características condicionan el área de cobertura, el ancho de banda, la lente y el emisor a escoger.

El sistema óptico (o lente) debe ser seleccionado de manera que atenué lo menos posible la señal en la longitud de onda de trabajo; el tamaño de la lente debe ser acorde

al tamaño del sensor PSD, además de tener una distancia focal acorde con el entorno y FoV deseado.

En cuanto al emisor este debe presentar un patrón de emisión acorde al ángulo de visión del sistema óptico, además de emitir a una longitud de onda lo más cercano posible a la máxima respuesta espectral del sensor PSD, tener suficiente potencia para poder trabajar de 5-6 metros como mínimo y el tiempo de subida más rápido que el sensor PSD que se utilice.

También se han descrito los problemas eléctricos debidos al sensor PSD y al circuito acondicionador, relacionados con las tolerancias y temperatura de los componentes que afectan al factor de ganancia de los amplificadores, ruidos del sistema, ruidos de cuantificación y efectos no lineales de los amplificadores.

En cuanto a los problemas ópticos analizados, los más importantes son las aberraciones de la lente y del sensor PSD. En las lentes las más comunes son las distorsiones radiales y tangenciales, y en cuanto al sensor PSD este también tiene una distorsión radial y su valor vendrá dado por el tamaño y por el tipo de sensor PSD. El mayor problema en este caso viene dado por el hecho que el centro de la distorsión provocada por la lente no coincida con el centro de la distorsión del sensor PSD.

Por último, se han propuesto varios métodos por el que determinar la posición 3-D del agente móvil, como son, calibración del plano por el que se mueve el agente móvil, posicionamiento utilizando la potencia recibida y marcas, por potencia recibida y estéreo y por potencia recibida y diferencia de fase.

En conclusión, los problemas eléctricos que se van a presentar se dividen en errores sistemáticos (tolerancias) y errores aleatorios (temperatura, ruido, ruido cuantificación), los errores sistemáticos son corregibles y el capítulo 4 se dedicará a investigar y proponer aportaciones para disponer de modelos y métodos para dimensionar y corregir los diferentes problemas. En cuanto a los errores aleatorios, estos se pueden reducir eligiendo bien los componentes, añadiendo filtros digitales o analógicos y aumentando el tiempo de adquisición.

Los errores analizados para el sistema óptico también son errores sistemáticos, y por tanto se pueden corregir. El capítulo 5 se dedicará a investigar y proponer aportaciones y describir modelos matemáticos del sistema óptico, así como el método de calibración para obtener el valor de los parámetros que entren en juego.

Para finalizar se presentan diferentes métodos de posicionamiento que se van a estudiar en el capítulo 6. El primer método, de la calibración del plano, tiene el condicionante que el agente móvil solo puede moverse por el plano calibrado; el segundo donde se utilizan marcas para calibrar la potencia transmitida, tiene el condicionante de que el agente móvil tiene que pasar por una de esas marcas para poder calibrar la potencia transmitida, en el caso de la potencia recibida y recepción estéreo tiene que pasar por una zona donde se solapen varias áreas de cobertura (aunque esto es sencillo

colocándola en una zona de paso frecuente) y por último en el caso que se utiliza la diferencia de fase, hay dos condicionantes, el primero que el robot debe desplazarse para poder calibrar la potencia transmitida y segundo la precisión de la medida debido a la variación de parámetros los osciladores.



## Capítulo 4

# Calibración Eléctrica

En este capítulo se va a analizar la influencia del circuito de acondicionamiento de las señales de salida del sensor PSD en la obtención del punto de impacto del haz de luz sobre la superficie del sensor PSD. Como se ha comentado en el capítulo 3, las corrientes generadas por el sensor PSD son de  $\mu\text{A}$ , lo que hace difícil su digitalización y por lo tanto es necesario amplificarlas para obtener mejor precisión en el cálculo del punto de impacto.

Las fuentes de error que se van a analizar son: el efecto de las tolerancias de los componentes relacionados con el factor de ganancia (resistencias y condensadores de retroalimentación de los amplificadores), la temperatura y el ruido de las señales así como el de la digitalización.

Todos los análisis de las diferentes fuentes de error se van a realizar bajo entorno de trabajo Matlab versión R2014a. Los valores empleados de componentes pasivos, circuitos de acondicionamiento así como del sensor PSD, son los que se emplean en la tarjeta de trabajo con la que se ha desarrollado esta tesis, como se irá comentando a medida que se avance en el análisis.

### 4.1 Análisis de las fuentes de error

En esta sección se van a analizar inicialmente las fuentes error de forma independiente y luego de forma conjunta, comenzando el análisis por el error producido por las tolerancias de los componentes seguido del efecto de la temperatura, los ruidos del sistema (ruido shot, ruido térmico y ruidos de los amplificadores) y efectos del ADC.

#### 4.1.1 Efecto de las tolerancias de los componentes del circuito eléctrico

El primer problema a analizar viene dado por las tolerancias intrínsecas de los componentes que afectan al valor nominal de estos y que provocarán que el factor de ganancia de los amplificadores y el comportamiento en frecuencia de los diferentes canales no



sean iguales. Esta consecuencia afectará al cálculo del punto de impacto, de manera que para un mismo valor de corriente de salida del sensor PSD la tensión a la salida de los amplificadores no será la misma.

Por lo tanto, a partir de (4.1), que representa el factor de ganancia ( $k$ ) del amplificador de transimpedancia, se va a calcular la variación de este factor debido a las tolerancias de la resistencia y del condensador y comprobar cómo influye en el cálculo del punto de impacto, utilizando (3.5) y (3.6).

$$k = \frac{R_f}{R_f C_f 2\pi f + 1} \quad (4.1)$$

donde  $C_f$  y  $R_f$  son respectivamente el condensador y resistencia de retroalimentación, y  $f$  la frecuencia de funcionamiento.

Haciendo uso de derivadas parciales con respecto  $R_f$  y  $C_f$  se puede calcular la variación del factor de ganancia en relación a la variación de los valores de la resistencia y del condensador, debidos a las tolerancias de los componentes, como se muestra en (4.2).

$$\Delta k = \left| \frac{\partial k}{\partial R_f} \right| \Delta R_f + \left| \frac{\partial k}{\partial C_f} \right| \Delta C_f = \left| \frac{1}{(R_f C_f 2\pi f + 1)^2} \right| \Delta R_f + \left| \frac{R_f^2 2\pi f}{(R_f C_f 2\pi f + 1)^2} \right| \Delta C_f \quad (4.2)$$

donde  $\Delta R_f$  es la variación del valor nominal de la resistencia de feedback y  $\Delta C_f$  la variación del valor nominal del condensador de retroalimentación. Como se comprueba, el error en el factor de ganancia también depende de la frecuencia de trabajo ( $f$ ).

En la figura 4.1 se muestra un ejemplo de cómo varía el factor de ganancia con respecto a la frecuencia, siendo los valores de  $R_f$  y  $C_f$  de 50 kΩ y 33 pF, respectivamente y en el caso de que las tolerancias sean de 1 % y 5 % (color azul) para un primer caso y de 0.1 % y 2 % (color verde).

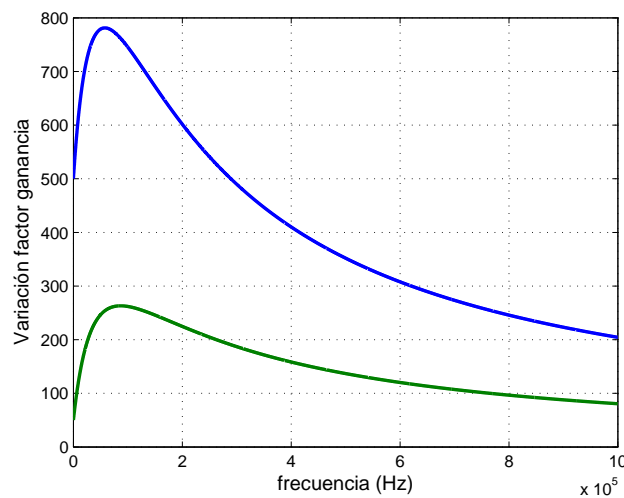


Figura 4.1: Variación del factor de ganancia de un canal del sensor PSD con respecto a la frecuencia de trabajo, siendo  $R_f=50$  kΩ y  $C_f=33$  pF

A la vista de los resultados de la figura 4.1 se puede observar como el hecho de tener componentes con precisión mejora las variaciones de la ganancia. Posteriormente, se justificará como repercute este factor en el total de las posibles variaciones. En nuestro caso el sensor PSD escogido ha sido el S5991-01 [PSD S5991-01, ] el cual tiene un ancho de banda aproximadamente de 170 kHz, por lo que la frecuencia de trabajo estará comprendida en ese ancho de banda.

Como ejemplo en el caso de que las tolerancias sean de 1 % y 5 % para la resistencia y el condensador respectivamente, la variación del factor de ganancia a 80 kHz es de 768.96, en caso de haber optado por componentes de tolerancias más bajas, por ejemplo, de 0.1 % y de 2 % la variación del factor de ganancia a 80 kHz sería de 262.76.

Una vez conocida la variación de la ganancia, se ha realizado una simulación para mostrar cómo influyen las tolerancias de los valores de los componentes en el cálculo del punto de impacto.

En la figura 4.2 se muestra los errores en el cálculo del punto de impacto sobre toda la superficie del sensor PSD. Los puntos azules representan la posición ideal de los diferentes puntos (los valores nominales de los componentes), los rojos la posición errónea que se detecta cuando los valores de los factores de ganancias son diferentes en el caso de tolerancias de 1 % y de 5 % y los puntos verdes en el caso de que las tolerancias fuesen de 0.1 % y de 2 %. Se ha simulado que el factor de ganancia de cada canal puede tomar valores  $k = k_{\text{nom}} \pm \Delta k$ , siendo  $k_{\text{nom}}=27332$  obtenida de (4.1) para una frecuencia de 80 kHz y  $\Delta k$  una variable aleatoria uniforme  $U[a, b]$  acotada entre  $\pm 768.96$  para el primer caso y de  $\pm 262.76$  para el segundo caso. Las gráficas y los datos de la emulación se han obtenido a partir de 10000 iteraciones.

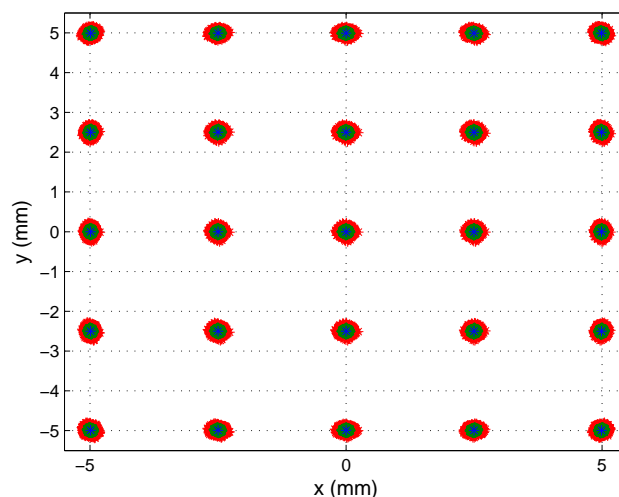


Figura 4.2: Error en el punto de impacto debido a diferencias en los factores de ganancia

Para apreciar el efecto de dichas desviaciones de los puntos ideales de la figura 4.2 en la figura 4.3.a se muestra ampliado a modo de ejemplo, el punto de la coordenada

(0,0). Por su parte en la figura 4.3.b se representa la distribución de su error de distancia euclídea.

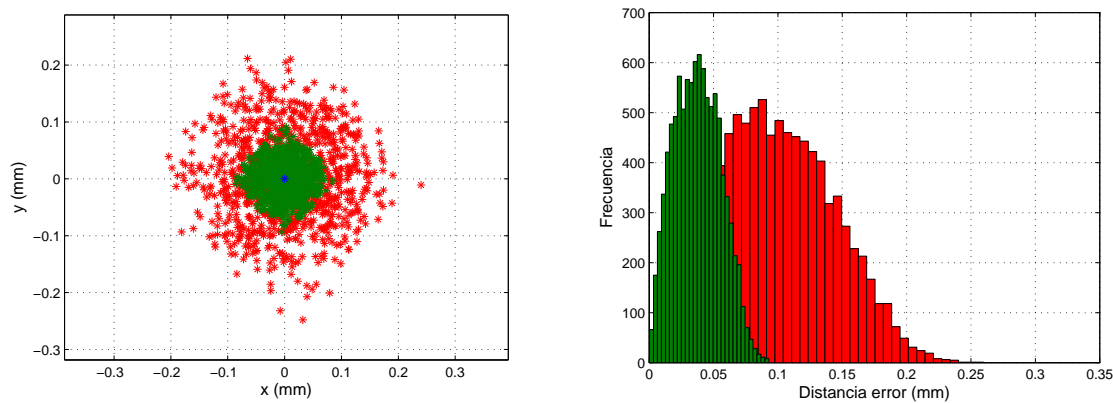


Figura 4.3: Error en el punto de impacto debido a diferencias en los factores de ganancia; (a) Punto central ampliado; (b) Histograma del punto central

En la tabla 4.1 se muestran los errores máximos y medio, y la desviación estándar del punto central para los dos casos simulados. Este error debido a las tolerancias se mantiene constante en toda la superficie del sensor PSD, con la diferencia que dependiendo del punto la excentricidad de la elipse de error será mayor en una u otra dirección.

Tabla 4.1: Errores máximos, medios y desviación estándar, debido a diferencias en los factores de ganancias de cada canal, para diferentes tolerancias en los componentes

Tolerancias	Resistencia = 1 %	Resistencia = 0.1 %
	Condensador = 5 %	Condensador = 2 %
Error máximo (mm)	0.237	$9.298 \cdot 10^{-2}$
Error medio (mm)	$9.547 \cdot 10^{-2}$	$3.758 \cdot 10^{-2}$
Desviación estándar (mm)	$4.605 \cdot 10^{-2}$	$1.799 \cdot 10^{-2}$

Como se ha comprobado el error producido por las tolerancias puede ser asumible en caso de utilizar componentes de alta fidelidad (error máximo  $9.298 \cdot 10^{-2}$  mm), en cambio sí se utilizan componentes comunes como pueden ser de 1 % de tolerancia para la resistencia y de 5 % de tolerancia para el condensador el error podría llegar a ser de 0.236 mm. Este error relativo al tamaño del sensor PSD, siendo este de 9x9 mm sería un error del 2.62 % del tamaño. Para este último caso en la sección 4.2 se mostrará un método para la corrección del error producido por las tolerancias.

#### 4.1.2 Efecto de la temperatura en los componentes eléctricos

Vistos los errores producidos por las tolerancias, vamos a analizar otra fuente de error que también influye en los valores nominales de los componentes pasivos como es la

temperatura.

Una variación de la temperatura también afecta a los valores reales de las resistencias y condensadores. La variación que sufren los valores de los componentes se indica en (4.3) y (4.4), donde  $\alpha_R$  es el coeficiente de temperatura de la resistencia y  $\alpha_C$  es el coeficiente de temperatura del condensador, suponiendo que la variación del condensador es lineal en el rango de temperaturas en las que se trabaja.

$$\Delta R_f = R_f \alpha_R \Delta T \quad (4.3)$$

$$\Delta C_f = C_f \alpha_C \Delta T \quad (4.4)$$

Al igual que en el caso de las tolerancias, se ha realizado una simulación de como la temperatura afecta al cálculo del punto de impacto. En este caso los valores de los componentes han sido los mismos que en el anterior caso, y en cuanto a la diferencia de temperatura simulada ha sido de  $5^\circ\text{C}$ , y los coeficientes de temperatura de  $\alpha_R=5 \cdot 10^{-4} \Omega/^\circ\text{C}$  y  $\alpha_c=3 \cdot 10^{-4} \text{ pF}/^\circ\text{C}$ , para la resistencia y el condensador respectivamente, siendo estos valores típicos para los tipos de encapsulados que se han utilizado.

De esta forma, la variación de la temperatura conlleva una oscilación en el valor de la resistencia de hasta  $125 \Omega$  y en el condensador de  $4.95 \cdot 10^{-2} \text{ pF}$ . Aplicando (4.2), la variación en el factor de ganancia sería de 55.93. En la figura 4.4 se muestra el error en el punto central del sensor PSD, en caso de que la variación en la temperatura entre canales fuese de  $5^\circ\text{C}$ . Esta simulación se ha realizado tomando el factor de ganancia como una variable uniforme  $U[a, b]$ .

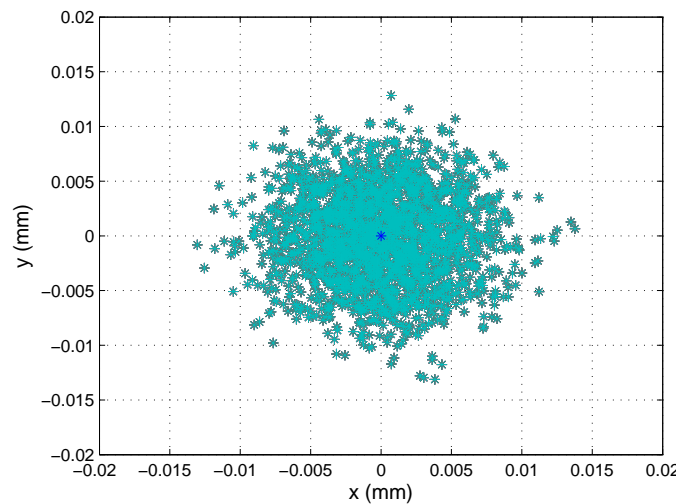


Figura 4.4: Error en el cálculo del punto de impacto en el centro del sensor PSD debido a  $5^\circ\text{C}$  de diferencia en la temperatura entre canales

En este caso el error máximo en el punto de impacto es de  $1.379 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$ , el error medio de  $5.336 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$  y la desviación típica de  $2.5519 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$ , el error máximo re-

lativo al tamaño del sensor PSD es de 0.153 % lo que es un error despreciable si lo comparamos con el error que pueden producir las tolerancias.

#### 4.1.3 Efecto del SNR en el cálculo del punto de impacto

Otro de los problemas que también causa incertidumbre en la medida, es el ruido en las señales a la salida de los amplificadores. Estos ruidos como se ha comentado en el apartado 3.2.2 son básicamente el ruido shot, el ruido térmico y el ruido de los AO. El efecto que tienen estos ruidos en el cálculo del punto de impacto de impacto, dependerá además del ancho de banda del sistema.

Con lo cual, en el peor de los casos los valores debido al sensor PSD S5991-01, son: corriente de oscuridad de 50 nA, fotocorriente máxima de 500  $\mu$ A, resistencia interna máxima de 15 k $\Omega$ , y capacidad interna de 500 pF, todos estos valores con una polarización en inversa de 5 V que es la utilizada en el caso real. Siendo los mismo valores para la resistencia y el condensador de retroalimentación que en los ejemplos anteriores (50 k $\Omega$ , y 33 pF), la temperatura absoluta de 298 grados Kelvin, y los ruidos de los amplificadores de 16 nV/Hz y 1.1 fA/Hz, en la figura 4.5.a se muestra la densidad espectral de potencia máxima que puede darse a la salida del amplificador de transimpedancia en relación con la frecuencia y en la figura 4.5.b el ruido total a la salida de los amplificadores en relación al ancho de banda, siendo  $V_s$  la tensión debida al ruido shot,  $V_{R_{ie}}$  y  $V_{R_f}$  la tensión debida al ruido térmico de la resistencia de interelectrodo y de retroalimentación, respectivamente,  $V_{en}$  y  $V_{in}$  las tensiones debidas a los ruidos de los amplificadores y  $V_n$  que es la suma de todos los ruidos.

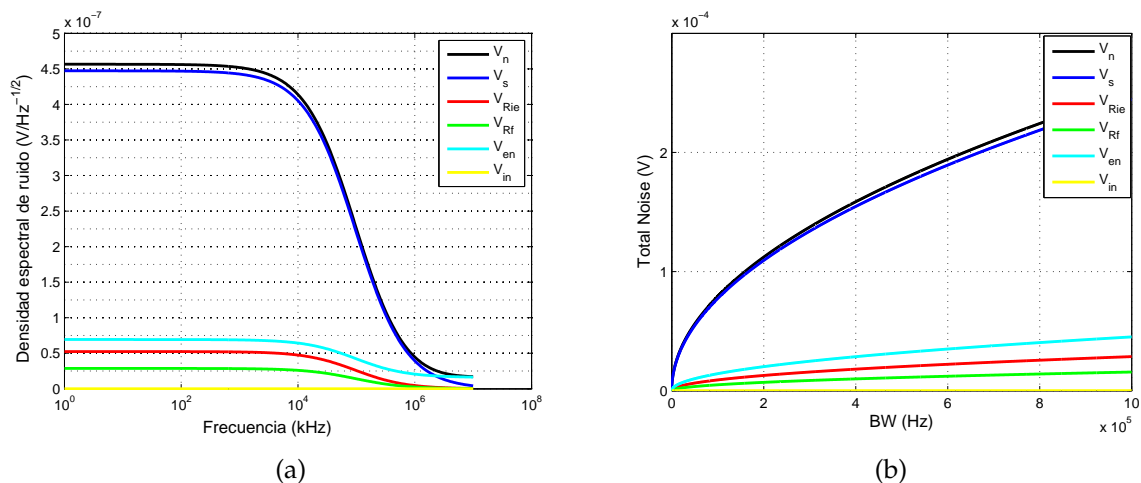


Figura 4.5: Ruido del sistema; (a) Densidad espectral de ruido; (b) Ruido total a la salida

A partir de los resultados obtenidos en la simulación de la figura 4.5, con los valores supuestos anteriormente, el ancho de banda del amplificador es de 960 kHz aproximadamente. Esto hace que el ruido total a la salida de nuestro sistema sea de  $2.4666 \cdot 10^{-4}$  V. Además se observa como la mayor contribución de ruido procede del ruido Shot

( $V_s$  color azul en las gráficas). Éste está relacionado con la fotocorriente que genera el sensor PSD y por tanto este valor de ruido es un caso peor del que habría en realidad, ya que, el ruido disminuye como también lo haría la potencia de la señal.

Como se muestra en las figuras el ruido total dependerá del ancho de banda y debido a que el sensor PSD tiene un ancho de banda de 170 kHz, se pueden realizar filtros paso bajos a esa frecuencia, con lo que el ruido total a la salida sería de  $9.779 \cdot 10^{-5}$  V. Además, el punto de impacto lo calculamos utilizando el RMS (root mean square) de las señales, esto conlleva que cuanto mayor sea el tiempo de adquisición de la señal, el ruido afectará menos a la medida.

Para simular como afecta el ruido al cálculo del punto de impacto se va a realizar en función del SNR y por tanto el ruido será calculado con la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{V}{10^{\frac{\text{SNR}}{20}}} \quad (4.5)$$

donde  $\sigma$  es el valor RMS del ruido en cada una de las señales de salida del amplificador de transimpedancia y  $V$  el valor RMS de la señal sin ruido.

Para realizar las simulaciones se ha modelado  $\sigma$  como ruido blanco gaussiano (AWGN) siendo la desviación estándar el valor obtenido de (4.5), para cada nivel de SNR.

Por lo tanto, a partir de (3.13) y (3.14), se ha obtenido la figura 4.6 donde se muestran en azul los puntos de impacto erróneos para un SNR de 20dB, en verde para un SNR de 30dB y en rojo para un SNR de 40dB. Este ruido se ha añadido a señales sinusoidales a una frecuencia de 80 kHz, muestreadas a una frecuencia de 10 MHz (la frecuencia de muestreo es 125 veces la de entrada) durante 255 ciclos de la señal de entrada, es decir, 3.1875 ms.

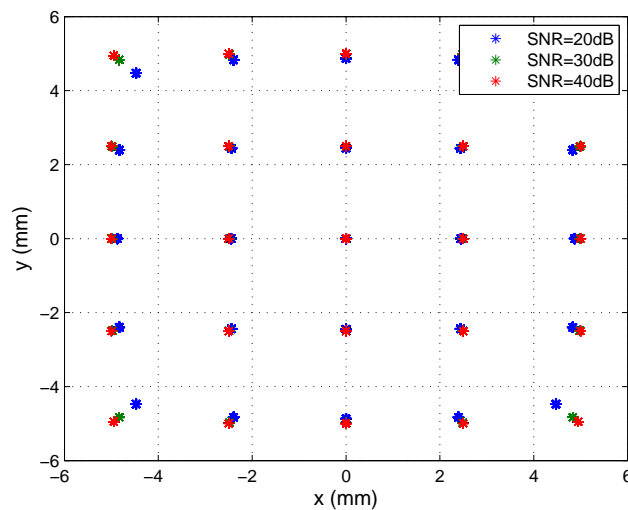


Figura 4.6: Error en el cálculo del punto de impacto en función del SNR

Tabla 4.2: Errores máximos y medios y desviación estándar para diferentes SNR en el punto de impacto (5,-5)

SNR(dB)	20	30	40	50	60
Error máximo (mm)	0,7581	0,2405	$7,5952 \cdot 10^{-2}$	$2,4096 \cdot 10^{-2}$	$7,6319 \cdot 10^{-3}$
Error medio (mm)	0,7454	0,2369	$7,4970 \cdot 10^{-2}$	$2,3716 \cdot 10^{-2}$	$7,5055 \cdot 10^{-3}$
Desviación típica (mm)	$3,5272 \cdot 10^{-3}$	$1,1801 \cdot 10^{-3}$	$3,6709 \cdot 10^{-4}$	$1,2138 \cdot 10^{-4}$	$3,8867 \cdot 10^{-5}$

Como se comprueba en la figura 4.6, el error en el punto de impacto no solo depende del SNR sino el punto de impacto real, siendo mayor el error cuanto mayor distancia hay con respecto al centro. En la tabla 4.2 se muestran los errores máximos, medios y desviaciones típicas que se producen a los diferentes valores de SNR en el peor de los casos, es decir, los errores en los extremos del sensor PSD. Para apreciar mejor estos, en la figura 4.7 se muestra una ampliación del error en el punto de impacto (5,-5).

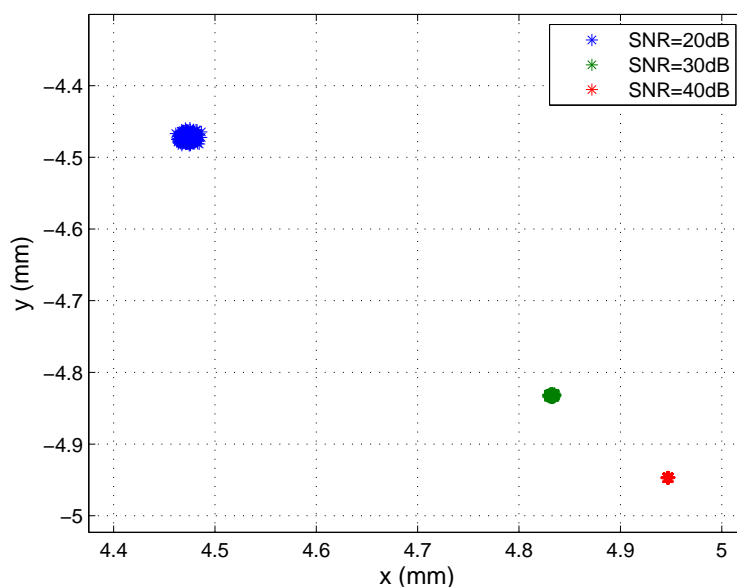


Figura 4.7: Ampliación del error en el cálculo del punto de impacto de la coordenada (5,-5)

Como conclusión de esta experimentación simulada, se puede decir que el error debido al SNR, puede llegar a ser relevante si éste es menor de 40 dB y el punto de impacto esta en los extremos, en caso de estar el punto de impacto a 0.5 mm de los bordes, es decir, en un rango comprendido entre -4.5 y 4.5 mm del sensor PSD, un SNR incluso de 20 dB provoca errores por debajo de 100  $\mu\text{m}$ , siendo menor a medida que el punto de impacto este más próximo al centro.

#### 4.1.4 Análisis del efecto de la cuantificación

Por último, se analiza el efecto debido a la digitalización de las señales procedentes del sensor. El error en el cálculo del punto de impacto debido a este factor dependerá de

la amplitud de señal de entrada, la resolución del ADC, la frecuencia de muestreo y el SPAN (rango de conversión).

Igual que en los anteriores casos, se ha realizado una simulación para comprobar el efecto del ADC en el cálculo del punto de impacto. Los valores empleados para dicha simulación han sido: SNR del sistema de 20 dB, la frecuencia de muestreo de 10 MHz, el SPAN de 10 V, para 4, 6, 8 y 16 bits ( $n$ ) de resolución del ADC y la amplitud de las señales son variables con respecto al punto de impacto, siendo de 10 V la suma de las amplitudes y por lo tanto el efecto del ADC dependerá también del punto de impacto, todos estos valores son valores peores de los que se tendrían en realidad, ya que el SPAN estará mejor ajustado y el SNR del sistema, como ya se ha comentado será mayor, sin embargo esto da una idea de cómo afectará el ADC al sistema. En la figura 4.8 se muestran los puntos de impacto, de forma que se puede comprobar que cuando el número de bits es superior a 6 (color verde, rojo y negro), la figura es muy parecida a la figura 4.6 cuando el SNR era de 20 dB.

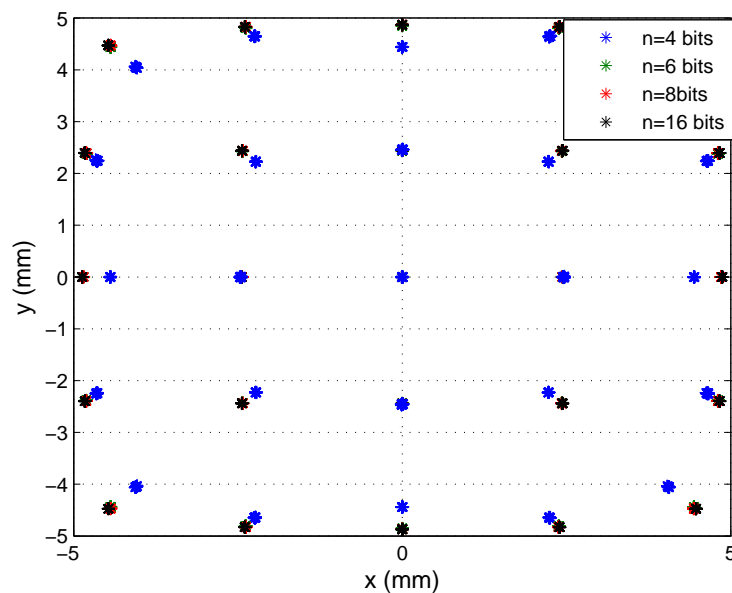


Figura 4.8: Error en el cálculo del punto de impacto debido al ruido del sistema (SNR=20 dB) y al  $SNR_Q$

Para comprobar mejor como es el efecto del ADC, se muestra una ampliación de diferentes puntos de impacto en la figura 4.9.



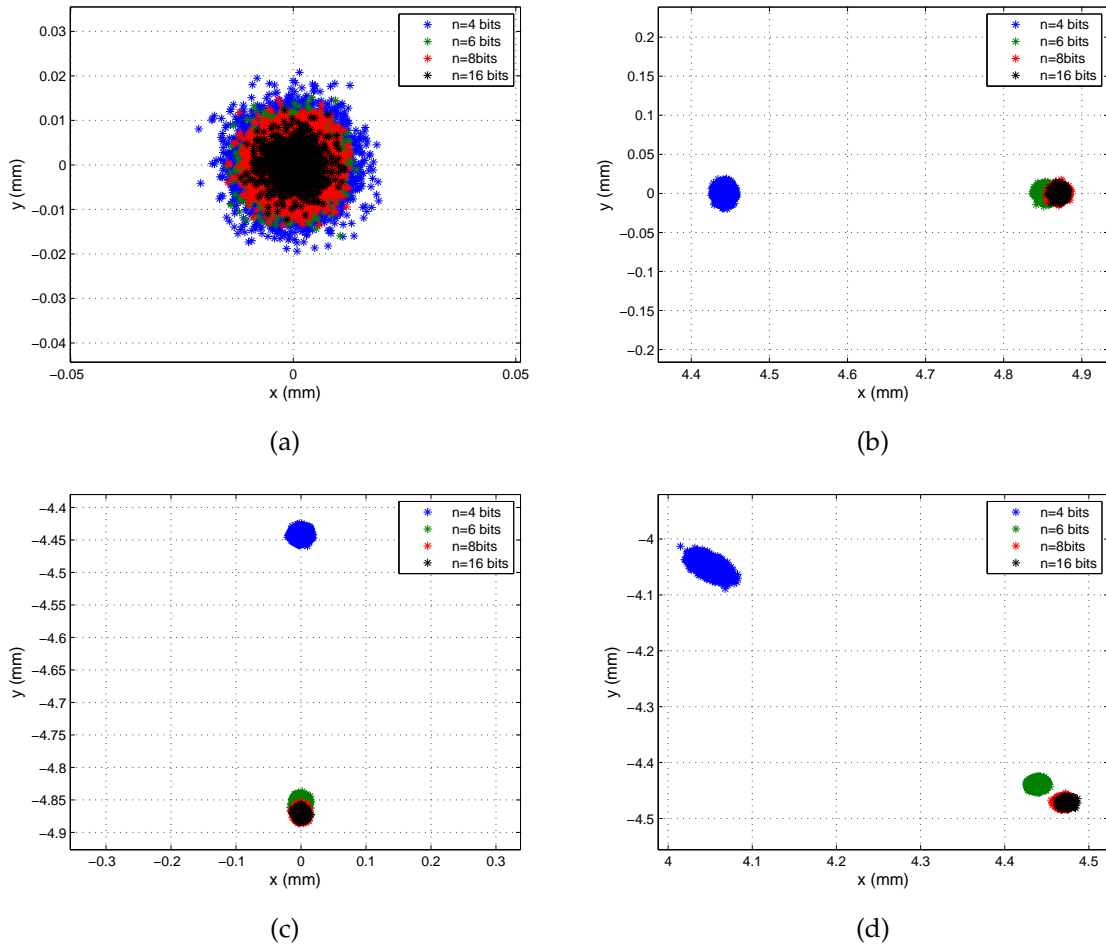


Figura 4.9: Error en el cálculo del punto de impacto debido al ruido del sistema ( $\text{SNR}=20$  dB) y del  $\text{SNR}_Q$ ; (a) Coordenada (0,0); (b) Coordenada (5,0); (c) Coordenada (0,-5); (d) Coordenada (5,-5)

En estas figuras se comprueba gráficamente que cuando el punto de impacto se produce en los extremos del sensor PSD el error tiende a aumentar de igual forma que pasaba con el SNR del sistema. En la tabla 4.3 se muestran los errores debido a los ruidos del sistema y a la digitalización en diferentes puntos del sensor PSD, particularizado para el caso de utilizar 6 bits.

Tabla 4.3: Errores máximos y medios y desviación típica en diferentes puntos de impacto, para SNR de 20 dB y 6 bits de conversión

Punto de impacto (x,y)	(0,0)	(5,0)	(0,-5)	(5,-5)
Error máximo (mm)	$1,9079 \cdot 10^{-2}$	0,1630	0,1629	0,8066
Error medio (mm)	$5,1478 \cdot 10^{-3}$	0,1455	0,1455	0,7931
Desviación típica (mm)	$2,6715 \cdot 10^{-3}$	$4,5764 \cdot 10^{-3}$	$4,4892 \cdot 10^{-3}$	$3,7757 \cdot 10^{-3}$

Como era de esperar, si comparamos los resultados del punto (5,-5) con los resul-

tados de la anterior simulación (figura 4.6) donde solo se tenían en cuenta el SNR del sistema, los errores aumentan. El incremento de los errores en caso de utilizar 6 bits de resolución es aproximadamente de 0.05 mm en el error máximo y medio, sin embargo a partir de los 8 bits de resolución no hay diferencias en los errores, esto es debido a que el  $SNR_Q$  aumenta de tal manera que es muy superior que al del SNR del sistema.

#### 4.1.5 Conclusiones de las simulaciones

Todos los efectos analizados en este apartado (Tolerancias, Temperatura, SNR, SNR de cuantificación), se pueden dividir en los que producen errores aleatorios como los ruidos del sistema y de cuantificación y los efectos que producen errores sistemáticos como es el efecto por las tolerancias y la temperatura.

En el caso de los errores sistemáticos se ha comprobado que son una fuente de error muy considerable que no podemos asumir y que es necesario eliminarlos o reducirlos, para ello se propone un método de calibración a partir del cual obtener la relación entre los factores de ganancia de cada canal. Respecto de los coeficientes de temperatura, podría bastar con ser cuidadosos con la selección y colocación de componentes en el diseño de la tarjeta de circuito impreso.

En cambio, los errores aleatorios no pueden ser calibrados, sin embargo, como se ha comprobado, el efecto de estos es despreciable a partir de un nivel de SNR y cuando se sigan ciertos criterios a la hora de seleccionar los componentes y sus características.

Llegados a este punto, se va a proceder en el siguiente apartado a proponer un método de calibración de los factores de ganancia de los diferentes canales, que permita mitigar el error de posicionamiento.

## 4.2 Método de calibración

Una vez vistas las diferentes fuentes de error asociadas a un sensor PSD, es necesario corregir los diferentes comportamientos de las etapas de amplificación del circuito eléctrico para que sean iguales. Es decir, que las corrientes estén acondicionadas de igual forma para que aunque todos los canales presenten componentes iguales, las no homogéneas desviaciones de estos, se vean compensadas. Por ello se ha desarrollado un método de calibración que permite calcular la diferencia en los factores de ganancias de las diferentes señales de salida del sensor PSD. Este método se basa en la iluminación homogénea de la superficie del sensor PSD de tal forma que la corriente que genere el PSD se reparta entre sus terminales de igual forma. Así las diferencias de amplitud obtenidas en las salidas de los amplificadores, serán debido a diferencias en el comportamiento del PSD y al factor de ganancia de cada canal.

Para iluminar de forma homogénea el sensor, se propone usar un emisor IR y colocarlo a una distancia lo suficientemente alejada para que el ángulo sólido que cubra

el sensor PSD sea pequeño y la intensidad radiada en cada una de las direcciones que cubre ese ángulo sólido sea la misma. Aquí se puede jugar también con el patrón de emisión del IRED. Por ejemplo, en el caso de un emisor con un patrón de emisión lambertiano la diferencia de intensidad radiada en 0 y 2 grados en el ángulo de emisión es de 0.06 %. Si se selecciona un emisor con un patrón de emisión más abierto ese porcentaje se reduce.

Como se muestra en la figura 4.10 el ángulo sólido ( $\Omega$ ) que cubre el PSD dependerá de la distancia ( $d$ ) a la cual se ubique éste, así como de su tamaño. También hay que tener en cuenta el nivel de potencia que reciba el sensor PSD, ya que disminuye con el cuadrado de la distancia, con lo cual hay que llegar a un compromiso entre el ángulo de incidencia y la distancia.

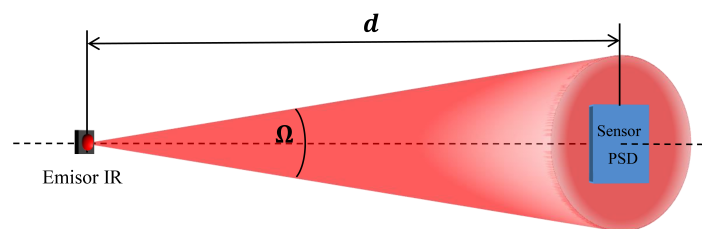


Figura 4.10: Representación del ángulo sólido con iluminación homogénea

El procedimiento a seguir para realizar la calibración del PSD es el siguiente:

- Para asegurar que el sensor PSD está encuadrado en una zona donde la iluminación es homogénea, centramos el sensor PSD con el emisor IRED y una vez centrado movemos el sensor en todas las direcciones y comprobamos que no hay variaciones en las señales de salida del sensor PSD.
- Una vez colocado con iluminación homogénea se procede a medir y registrar los valores de ganancia que da cada canal, realizando múltiples ensayos, obteniendo un valor medio y su desviación típica. Este procedimiento se hará a su vez con señales de emisión a diferentes frecuencias, ya que el comportamiento de la etapa de amplificación de cada señal depende de la frecuencia.

Es importante destacar aquí que lo que interesa obtener es la relación de ganancias entre los diferentes canales, por lo que se tomará como referencia la de uno de ellos y se calculará su relación para compensar posteriormente las medidas. En nuestro caso utilizamos el canal 1 como referencia.

- Como modelo para el ajuste se propone una función de segundo grado ( $G_i$ ) dependiente de la frecuencia ( $f$ ), como se indicada en (4.6).

$$G_i = a_{1j}f^2 + a_{2j}f + a_{3j} \quad (4.6)$$

donde  $j=2,3,4$ . Este modelo se ajusta a las diferencias en los factores de ganancia en los peores casos, aunque en algunos de ellos podría obtenerse una relación lineal o constante en todo el rango de frecuencias (depende del PSD y los componentes utilizados).

Los parámetros  $a$  son calculados, para cada una de las ramas, mediante mínimos cuadrados, siendo la forma de la ecuación  $Ax = b$ , la solución que minimiza la norma es  $x = (A^T A)^{-1} A^T b$ .

$$A = \begin{pmatrix} f_1^2 & f_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ f_n^2 & f_n & 1 \end{pmatrix} \quad x = \begin{pmatrix} a_{1j} \\ a_{2j} \\ a_{3j} \end{pmatrix} \quad x = \begin{pmatrix} \frac{V_{ref}(f_1)}{V_j(f_1)} \\ \vdots \\ \frac{V_{ref}(f_n)}{V_j(f_n)} \end{pmatrix}$$

- Una vez calculados estos parámetros, las ecuaciones (3.5) y (3.6), que eran las ecuaciones para el cálculo del punto de impacto, se transforma en (4.7) y (4.8) que son las ecuaciones con el error de las tolerancias de los componentes corregidos.  $V_i$  representan los valores de tensión de salida corregidos.

$$x = \frac{L_x (V_2 + V_3) - (V_1 + V_4)}{2 (V_1 + V_2 + V_3 + V_4)} \quad (4.7)$$

$$y = \frac{L_y (V_1 + V_2) - (V_3 + V_4)}{2 (V_1 + V_2 + V_3 + V_4)} \quad (4.8)$$

donde  $L_x$  y  $L_y$ , es el tamaño del sensor PSD, y  $V_{(j=1,2,3,4)}$  las señales de salida del sensor PSD calibradas eléctricamente. En el caso de que la señal 1 sea la referencia, tenemos que:

$$\begin{aligned} V_1 &= V_{o1} & V_2 &= V_{o2}(a_{11}f^2 + a_{21}f + a_{31}) \\ V_3 &= V_{o3}(a_{12}f^2 + a_{22}f + a_{32}) & V_4 &= V_{o4}(a_{13}f^2 + a_{23}f + a_{33}) \end{aligned}$$

En conclusión, el método de calibración es un método sencillo de realizar que permite corregir los errores sistemáticos del sistema, con bastante precisión, como se demostrará en el apartado de resultados. Esto permite medir sin errores considerables y además evitar que se propaguen a los parámetros intrínsecos del sistema, necesarios para la corrección de los efectos debidos a las lentes y la medición del ángulo de incidencia.

### 4.3 Pruebas experimentales

Analizados todos los problemas que afectan al error de medida con un sensor PSD, y propuesto un método para poder calibrar los errores sistemáticos, se han realizado diferentes pruebas experimentales que permitan corroborar los resultados y conclusiones obtenidos tras las simulaciones. Las pruebas se han realizado con el sensor PSD S5991-01 y el emisor IR de Osram SFH-4233 [SFH-4233, ]. Los modelos de amplificadores operacionales utilizados son OPA4820 [OPA, ], las resistencias de 50 k $\Omega$  y condensadores de 33 pF. El resultado de las señales digitalizadas, serán adquiridas mediante la

tarjeta de adquisición de datos Gage CS8284 [CS8284, ], esta tarjeta tiene las siguientes características:

- Canales: 8 canales de entrada analógica simultáneos.
- Frecuencia de muestreo: Hasta 50 MS/s
- SPAN: de 100 mV hasta 10 V.
- Resolución: 12-bits.
- Memoria: 128 MS.
- Acoplamiento: AC y DC.
- Impedancia de entrada: 50  $\Omega$  o 1M $\Omega$ .
- Ancho de banda: 100 MHz.

La infraestructura en la cual se han realizado las pruebas se muestra en la figura 4.11, en la que se tiene un soporte automatizado con 5 grados de libertad: 3 ejes de traslación con un error de posicionamiento menor de 0.1 mm y dos ejes de rotación con errores menores a 0.3 grados.

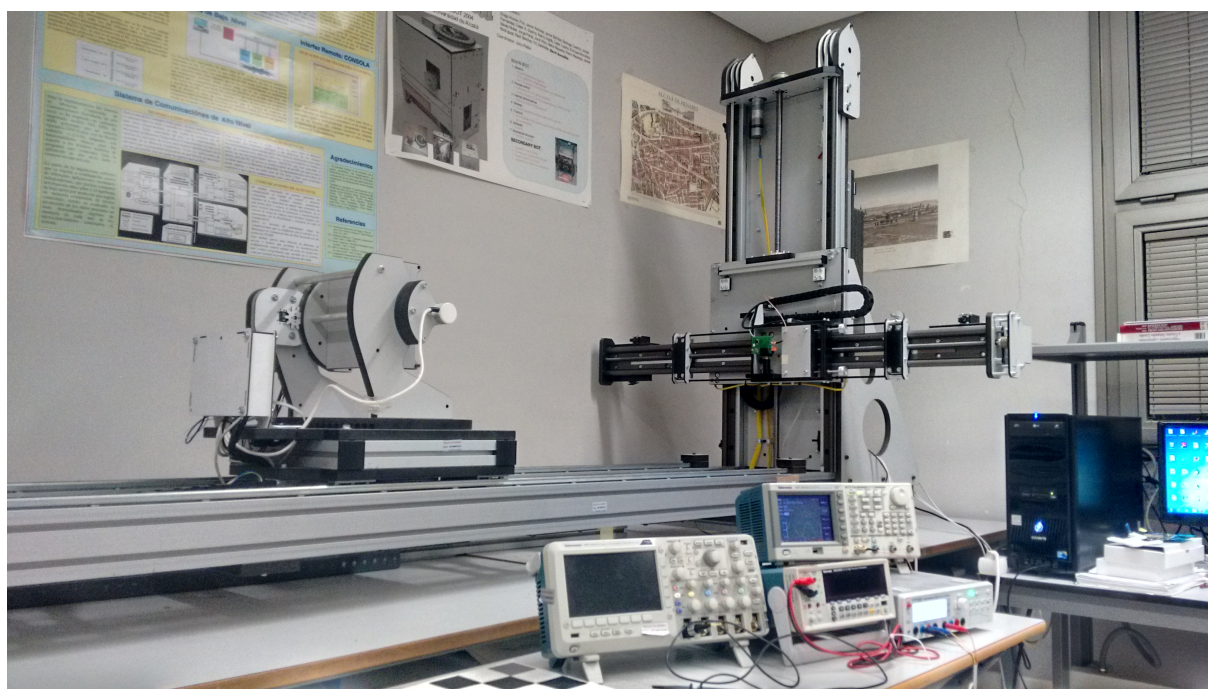


Figura 4.11: Soporte automatizado para pruebas

#### 4.3.1 Calibración de la ganancia de los diferentes canales

La primera prueba realizada ha sido la calibración eléctrica con el método y modelo explicados en el apartado 4.2 utilizando el emisor indicado. Para asegurar que el sensor

PSD es iluminado homogéneamente se ha posicionado el sensor a una distancia de 1 metro del emisor-IR con lo que el ángulo sólido máximo abarcado por el detector es de  $8,72 \cdot 10^{-5}$  Sr, si este se encontrase posicionado en el centro del sensor PSD.

El posicionamiento se hace de tal forma que emisor y receptor estén enfrentados lo mejor posible (mismo eje axial). Pero dado el valor del ángulo sólido cubierto, aunque no coincidan plenamente sus ejes axiales se puede asumir que la iluminación será homogénea; es más, aún existe un gran margen para poder realizar pequeños desplazamientos en la posición relativa y constatar que las corrientes de salida son las mismas en las diferentes posiciones (iluminación homogénea y constante).

Para comprobar que está iluminado homogéneamente, lo primero que se ha realizado ha sido un barrido en el eje vertical y otro en el eje horizontal, posicionando el emisor allí donde las amplitudes de las señales son máximas. A partir de esa posición se han realizado pequeños desplazamientos del sensor PSD en el eje vertical y horizontal, como se muestra en la figura 4.12.a. En la figura 4.12.b se muestra la relación entre los valores RMS de las señales, en esas posiciones.

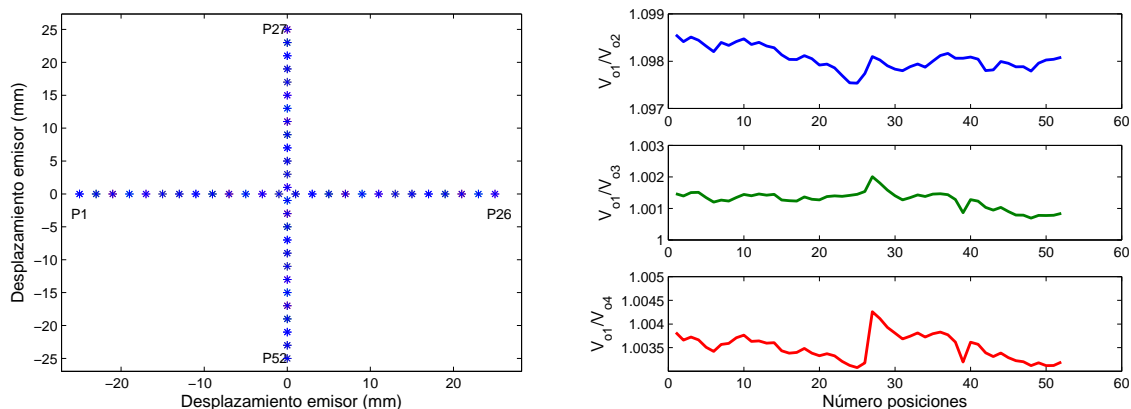


Figura 4.12: Prueba para constatar que la iluminación es homogénea; (a) Desplazamiento del emisor; (b) Diferencias de voltajes entre la señal 1 y las señales 2, 3 y 4

Estas pruebas se han realizado a una frecuencia de 1kHz, pero se podría haber realizado a cualquier otra frecuencia, ya que luego se hará un barrido a todas las frecuencias de intereses, además en cada una de las posiciones se han tomado 10 veces el valor RMS de las señales, siendo el tiempo de adquisición de 1 s.

A partir de la información mostrada en la figura 4.12 se ha podido comprobar que las relaciones se mantienen muy estables siendo las desviaciones típicas de  $2,4298 \cdot 10^{-4}$ ,  $2,7301 \cdot 10^{-4}$  y  $2,7217 \cdot 10^{-4}$ , para la relación de la señal 1, con las señales 2, 3 y 4 respectivamente y por lo tanto el sensor PSD está en una posición que ilumina toda la superficie del sensor PSD por igual, con lo que se va a realizar en esta posición el barrido a todas las frecuencias. En la figura 4.13 se muestra la variación de las relaciones de los canales con respecto a variaciones en la frecuencia de la señal del



emisor.

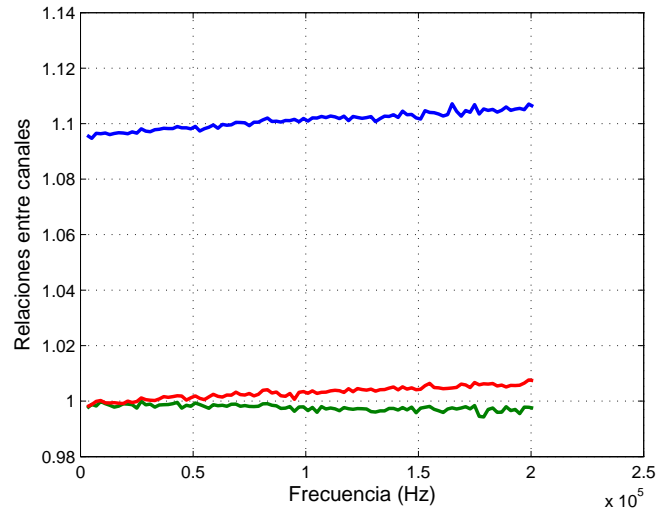


Figura 4.13: Relación de ganancia entre canales en función de la frecuencia

Así, los resultados de las diferencias entre los canales son:

$$G_1 = 7,44 \cdot 10^{-14} f^2 + 6,45 \cdot 10^{-8} f + 1,0956 \quad (4.9)$$

$$G_2 = 2,48 \cdot 10^{-14} f^2 - 7,7047 \cdot 10^{-8} f + 0,9991 \quad (4.10)$$

$$G_3 = -5,12 \cdot 10^{-14} f^2 + 4,66 \cdot 10^{-8} f + 0,9991 \quad (4.11)$$

Estos resultados indican que, en este caso, la diferencia de ganancias es prácticamente igual a todas las frecuencias, pero dependiendo del fabricante del PSD, del modelo y del circuito puede variar, por lo que se mantiene el modelo propuesto. También, se observa en el último parámetro del polinomio  $G_1$  existe una diferencia de aproximadamente de 0.1 frente a las otras señales.

Para mostrar cómo la diferencia en las ganancias afecta al cálculo del punto de impacto se ha realizado una prueba que ha consistido en barrer gran parte de la superficie del sensor PSD, con lo que, en la figura 4.14 se muestra en azul los puntos calculados sin la corrección eléctrica aplicada y en verde se muestran los puntos con la corrección eléctrica aplicada, como se puede ver la diferencia del factor de ganancia entre el canal 1 y el canal 2, produce un error significativo.

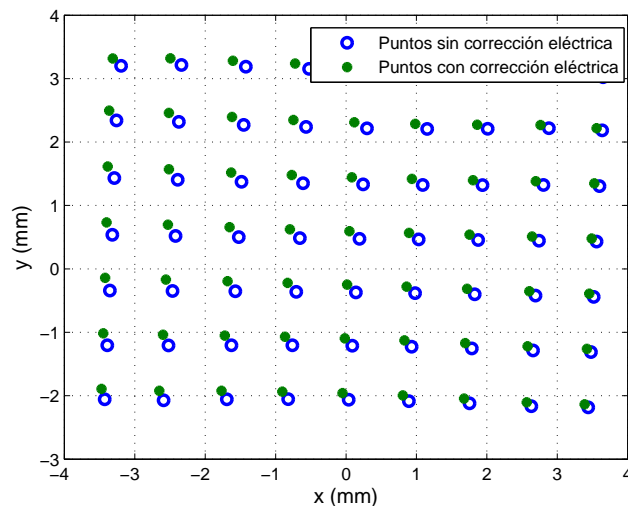


Figura 4.14: Diferencias obtenidas entre puntos medidos y puntos corregidos

En la figura 4.14 también se observa débilmente la distorsión radial del sistema, producida por la lente y el sensor PSD, esta distorsión será corregida en el siguiente capítulo donde se calibrará geométricamente el sistema. Un dato importante en este punto es que para la calibración geométrica parte del hecho que los puntos calculados no contienen error y por tanto si no se corrigiesen los factores de ganancia sucedería que el error producido por estas diferencias se trasladaría a la calibración geométrica, produciendo errores mayores en la siguiente etapa.

Una vez comprobada la necesidad de calibración y el efecto de las asimetrías entre canales de amplificación debidas a los componentes externos y amplificadores, se ha procedido a realizar ensayos con la temperatura. Dado que los componentes de los diferentes canales están muy próximos, aunque se ha tratado de calentar los elementos de uno de ellos con chorro de aire caliente, no hemos sido capaces de medir la variación debido al efecto de la temperatura. Esto se debe a que, como se comentó en el capítulo 3, varía muy poco y además es muy difícil modificar la temperatura de forma diferencial en tan pequeño espacio.

#### 4.3.2 Evaluación de la influencia del SNR del sistema

Para evaluar de forma empírica la influencia del SNR y medir el error en el cálculo del punto de impacto del haz de luz sobre la superficie del sensor PSD se ha procedido en primer lugar a medir la densidad espectral de ruido del sistema, siendo la distribución del canal 1 la que se muestra en la figura 4.15. Para obtener esta información se ha tapado la superficie de recepción del PSD y se han digitalizado las señales obtenidas por los diferentes canales ( $f_s = 10$  MHz y 12 bits de resolución, con SPAN de 0.1 V).



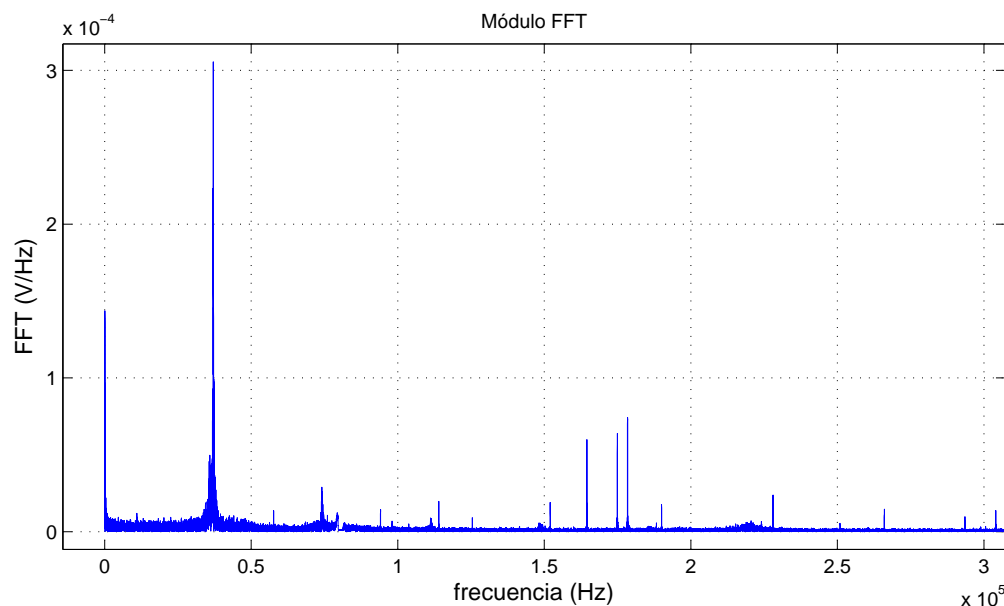


Figura 4.15: Densidad espectral de ruido del sistema (canal 1)

En la figura 4.15 se ve como el sistema no tiene únicamente ruido gaussiano, sino que también hay ciertas componentes que añaden ruido al sistema, estas componentes son sobretodo debidas a las fuentes de alimentación conmutadas siendo su frecuencia de conmutación comprendida entre 36 kHz y los 40 kHz.

Una vez calculado el ruido del sistema, se han realizado varias pruebas a diferentes SNR (40, 50, 60 dB), lo más centrado posible. Para ello se ha medido el ruido total en un ancho de banda de 4 kHz centrado en la frecuencia de trabajo (80 kHz), durante un tiempo de 3.1875 ms de igual manera que se hizo para la simulación y poder así comparar los resultados. A partir del valor del ruido se ha ajustado la potencia del emisor para obtener un SNR de 60 dB. Para las pruebas de 50 dB y 40 dB se han aplicado filtros ópticos hasta conseguir la potencia de señal en el sensor correspondiente a esos niveles de SNR. En estas medidas el n° de bits utilizados del ADC ha sido de 12 para que no influyan los errores de cuantificación y la frecuencia de muestreo de 10 MHz, estando el SPAN lo más ajustado posible al nivel de señal, para asegurar que el ADC influya lo menos posible en el error.

En la figura 4.16 se muestra en azul los puntos calculados para un SNR de 40 dB, en verde para 50 dB y en rojo para 60 dB, para cada una de las pruebas se muestran 400 puntos, como se puede observar la posición de las diferentes pruebas no coinciden en su centro esto es debido, a que al acoplar un filtro delante del receptor este desvía el haz de luz.

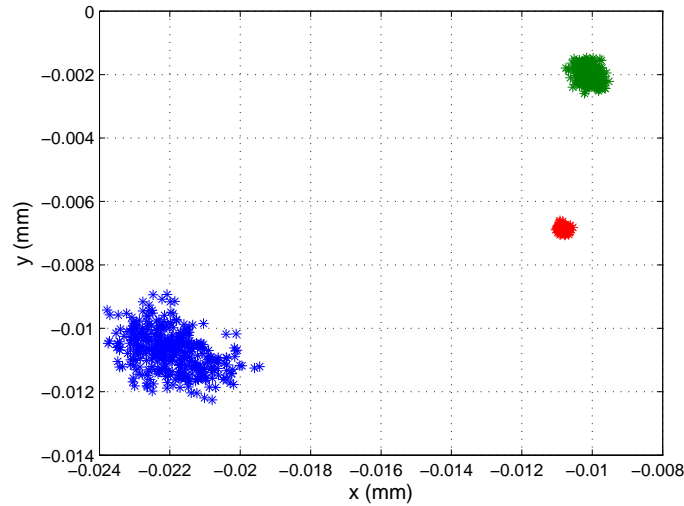


Figura 4.16: Error del cálculo del punto de impacto con diferentes valores de SNR

En la tabla 4.4 se muestra el error máximo, el error medio y la desviación típica, de cada una de las pruebas experimentales y los resultados de las simulaciones para el punto central del sensor PSD, los datos de las pruebas experimentales se han obtenido, suponiendo que el punto de impacto real es el centro de la nube de puntos.

Tabla 4.4: Comparación de los errores del SNR simulados con los errores de las pruebas experimentales

SNR(dB)	40		50		60	
	Medido	Simulado	Medido	Simulado	Medido	Simulado
Error máximo (mm)	$2,5672 \cdot 10^{-3}$	$2,2956 \cdot 10^{-3}$	$6,86139 \cdot 10^{-4}$	$5,9971 \cdot 10^{-4}$	$2,7735 \cdot 10^{-4}$	$2,1276 \cdot 10^{-4}$
Error medio (mm)	$9,1523 \cdot 10^{-4}$	$6,5682 \cdot 10^{-4}$	$2,6671 \cdot 10^{-4}$	$2,8322 \cdot 10^{-4}$	$1,064 \cdot 10^{-5}$	$6,3935 \cdot 10^{-5}$
Desviación típica (mm)	$4,7981 \cdot 10^{-4}$	$6,5772 \cdot 10^{-4}$	$1,3956 \cdot 10^{-4}$	$2,0255 \cdot 10^{-4}$	$5,4375 \cdot 10^{-5}$	$6,4607 \cdot 10^{-5}$

Como se comprueba en la comparación de los resultados, estos no coinciden plenamente esto se debe a que las simulaciones se han realizado suponiendo ruido blanco gaussiano y en cambio el ruido real no es únicamente ruido blanco gaussiano, sino que en el sistema real existen interferencias y ruidos debidos a otras fuentes como las fuentes de alimentación conmutadas, la luz del sol, etc, como se mostró en la figura 4.15.

### 4.3.3 Evaluación de la influencia del SNR de cuantificación

Para evaluar la influencia de la digitalización se ha realizado una prueba con una señal de 20 dB y para 4, 6 y 8 bits de resolución, de igual manera que se realizó en las simulaciones. En la figura 4.17 se muestra los puntos de impacto calculados.

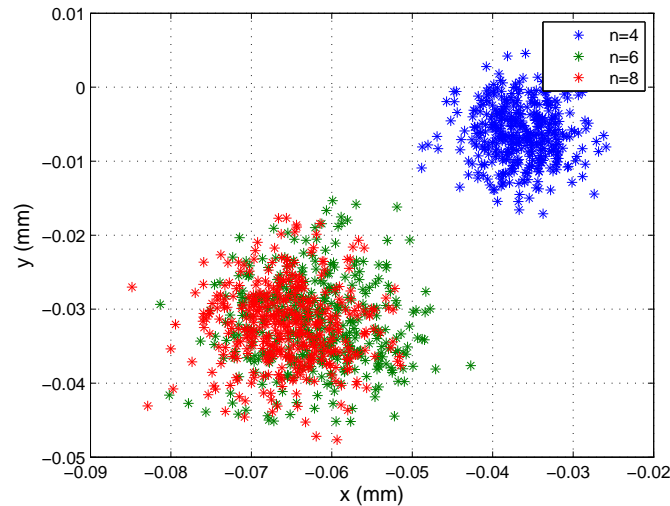


Figura 4.17: Error en el cálculo en el punto de impacto con SNR de 20 dB y 6 bits de resolución

En la tabla 4.5 se muestran numéricamente la desviación típica, el error medio y el error máximo para diferentes números de bits del ADC.

Tabla 4.5: Errores máximos y medios, y desviación típica en función del número de bits

Número de bits	4	6	8
Error máximo (mm)	$5,2160 \cdot 10^{-2}$	$2,05608 \cdot 10^{-2}$	$1,8284 \cdot 10^{-2}$
Error medio (mm)	$3,9741 \cdot 10^{-2}$	$7,6280 \cdot 10^{-3}$	$6,2475 \cdot 10^{-3}$
Desviación típica (mm)	$3,9369 \cdot 10^{-3}$	$3,9528 \cdot 10^{-3}$	$3,7582 \cdot 10^{-3}$

De los resultados obtenidos se puede concluir que bajo las condiciones de SNR de la señal y la configuración del ADC, a partir de 6 bits el error se mantiene constante, es decir, la digitalización no afecta al cálculo del punto de impacto. También se puede observar que bajar de bits no empeora la desviación típica, sino que el punto de impacto tiende al centro como ocurría en las simulaciones cuando estas no estaban en el origen del sensor PSD.

## 4.4 Conclusiones y futuros trabajos

En este capítulo se ha realizado un minucioso estudio analítico de los factores que afectan al error que comenten un sensor PSD y su circuito de acondicionamiento, en la determinación de la posición. Tras el análisis se ha concluido que existen varios tipos de errores, los cuales pueden clasificarse como aleatorios y sistemáticos. En el caso de los errores sistemáticos se ha comprobado que son una fuente de error considerable, que no pueden ser asumidos y, por tanto, deben ser eliminarlos.

Para eliminar o reducir el error producido por las diferencias de ganancia se ha propuesto un método que se ha demostrado factible de implementar y de utilizar sin

necesidad de disponer de infraestructuras complejas y costosas, permitiendo mitigar los errores. A pesar de que si se utilizan componentes de alta calidad los errores de determinación de los puntos de impacto se atenúan significativamente, la calibración se hace necesaria debido a que no se puede permitir propagar errores a la siguiente fase de calibración geométrica, ya que ésta los magnificará.

El otro efecto que produce errores sistemáticos es el debido a los coeficientes de temperatura. En este caso podría bastar con ser cuidadosos con la colocación de componentes en el diseño de la tarjeta de circuito impreso, colocándolos lo suficientemente cerca y en áreas que no tengan refrigeración diferente, de manera que la temperatura ambiente y posibles variaciones de ésta, sea igual en todos ellos. En este caso, y siguiendo las conclusiones aquí mencionadas, se ha intentado medir su influencia, pero no hemos sido capaces de notar diferencias, demostrando así que este error está solventado siguiendo estas recomendaciones.

Los errores aleatorios no pueden ser calibrados, sin embargo, como hemos comprobado, el efecto de estos puede ser despreciable siempre y cuando se sigan ciertos criterios a la hora de seleccionar los componentes y sus características. En el caso de la relación SNR como se ha comprobado, puede afectar significativamente al cálculo del punto de impacto, aunque esto se puede resolver adquiriendo más tiempo y/o haciendo filtros digitales más estrechos. En cuanto al SNR de cuantificación, siempre que este sea 10 dB mayor que el SNR del sistema no afectará.



## Capítulo 5

# Calibración geométrica

El objetivo de este capítulo es obtener un modelo óptico y desarrollar un método por el cual, se obtengan todos aquellos parámetros necesarios del conjunto sensor PSD-óptica para calcular el ángulo de incidencia de un haz de luz que impacte en el sensor PSD, y obtener la dirección en la que está ubicado el emisor con respecto al receptor. Se pretenden realizar aportaciones en el modelado óptico y calibración del sistema óptico (sensor PSD y óptica).

### 5.1 Modelado del sistema óptico

El modelo del sistema óptico propuesto se basa en el modelo pin-hole, este modelo representa un sistema óptico ideal y lineal, que relaciona el entorno con el plano imagen (en este caso la superficie del sensor PSD). Debido a que este modelo carece de lente y por tanto no incluye las distorsiones producidas por estas, en pasos subsiguientes se le añadirán estas distorsiones, además de la distorsión producida por el sensor PSD.

Por lo tanto, partiendo del esquema de la figura 5.1, que representa la formación de la imagen según el modelo pin-hole, se va a comenzar a proponer un modelo del sistema.

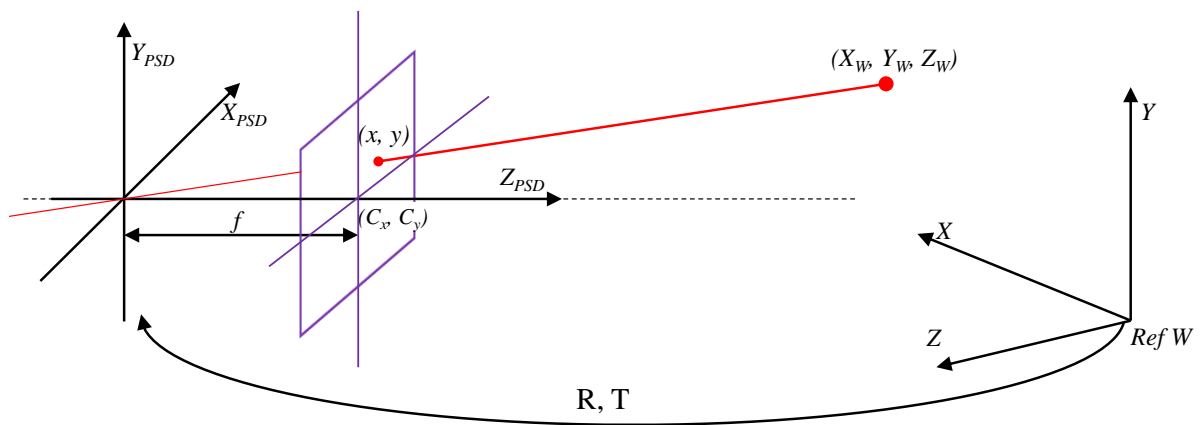


Figura 5.1: Representación del modelo Pin-Hole

En la figura 5.1  $(X_W, Y_W, Z_W)$  son las coordenadas de un punto según el sistema de coordenadas del entorno,  $(X_{PSD}, Y_{PSD}, Z_{PSD})$  el sistema de referencia del sensor PSD,  $(x, y)$  el punto de impacto en el plano imagen del sensor PSD,  $f$  la distancia focal del sistema óptico,  $(C_x, C_y)$  el centro óptico, y  $R, T$  los parámetros que relacionan el entorno con el sistema de referencia del sensor PSD.

Teniendo esto en cuenta, la relación entre el entorno y el sistema de referencia del sensor PSD, se define por medio de una matriz de rotación  $R$  (3x3) y un vector de traslación  $T$  (3x1), según (5.1). Estos parámetros se denominan parámetros extrínsecos debido a que relacionan la posición del sistema óptico con el entorno.

$$\begin{pmatrix} X_{PSD} \\ Y_{PSD} \\ Z_{PSD} \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \end{pmatrix} + T \quad (5.1)$$

La relación entre el sistema de referencia del sensor PSD y el plano imagen, se presenta en (5.2).

$$\begin{pmatrix} s \cdot x \\ s \cdot y \\ s \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} X_{PSD} \\ Y_{PSD} \\ Z_{PSD} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & \gamma & C_x \\ 0 & f & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{PSD} \\ Y_{PSD} \\ Z_{PSD} \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

donde se ha incluido el parámetro  $\gamma$ , que representa la oblicuidad entre los ejes. Los parámetros que relacionan el sistema de referencia del sistema óptico con el plano imagen se denominan parámetros intrínsecos, ya que dependen de los parámetros de los componentes utilizados y del ensamblaje de estos.

Por lo tanto el sistema que relaciona el entorno con el plano imagen según el modelo pin-hole, es un sistema lineal representado por (5.3).

$$\begin{pmatrix} s \cdot x \\ s \cdot y \\ s \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} f & \gamma & C_x \\ 0 & f & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & T_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & T_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & T_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

donde  $r_{ij}$  son los parámetros de la matriz de rotación,  $T_{x,y,z}$  son los parámetros del vector de traslación y  $\lambda$  es un factor de escala.

Como se ha comentado, este modelo no tiene en cuenta la lente, ni el tipo de sensor; por tanto, hay que añadir los efectos no lineales provocados por la lente y el sensor PSD. Teniendo en cuenta como se produce la distorsión, ya que, el haz de luz es desviado primero por la lente y posteriormente por el sensor PSD y por tanto la corrección ha de hacerse en orden inverso, primero se propone corregir la distorsión del sensor PSD y seguidamente la distorsión producida por la lente.

Para la corrección de las distorsiones se va a hacer uso de las ecuaciones de fotogrametría, con lo que partiendo del punto de impacto distorsionado, que denominaremos

$(x^d, y^d)$ , tenemos las ecuaciones (5.4) y (5.5).

$$D_x^{Pr} = x^d \cdot (l_1 h^2 + l_2 h^4 + \dots + l_n h_n^{n \cdot 2}) \quad (5.4)$$

$$D_y^{Pr} = y^d \cdot (l_1 h^2 + l_2 h^4 + \dots + l_n h_n^{n \cdot 2}) \quad (5.5)$$

En dichas ecuaciones,  $h$  es la distancia euclídea entre las coordenadas  $(x^d, y^d)$  y el centro de la distorsión, en este caso el centro geométrico del PSD, punto  $(0, 0)$ , y los parámetros  $l$  son los parámetros que modelan la distorsión radial del sensor PSD.

Llegados a este punto tenemos que:

$$(x^u = x^d + D_x^{Pr}) \quad (5.6)$$

$$(y^u = y^d + D_y^{Pr}) \quad (5.7)$$

donde  $(x^u, y^u)$  son las coordenadas del punto con la distorsión del sensor PSD corregida. Ahora a esta coordenada es necesario corregirle la distorsión producida por la lente.

La lente no solo produce una distorsión radial, sino que también produce una distorsión tangencial. Comenzando por la radial, las ecuaciones (5.8) y (5.9) modelarán esta distorsión.

$$D_x^{Lr} = (x^u - C_x) \cdot (k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots + k_n r_n^{n \cdot 2}) \quad (5.8)$$

$$D_y^{Lr} = (y^u - C_y) \cdot (k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots + k_n r_n^{n \cdot 2}) \quad (5.9)$$

donde  $r$  es la distancia euclídea del punto  $(x^u, y^u)$  al centro óptico  $(C_x, C_y)$ , y  $k$  es el parámetro que modela la distorsión radial de la lente. Y por último tenemos la distorsión tangencial, que se modela según las ecuaciones (5.10) y (5.11).

$$D_x^t = p_1 (r^2 + 2(x^u - C_x)^2) + 2p_2 (x^u - C_x)(y^u - C_y) \quad (5.10)$$

$$D_y^t = p_2 (r^2 + 2(y^u - C_y)^2) + 2p_1 (x^u - C_x)(y^u - C_y) \quad (5.11)$$

donde  $p_1$  y  $p_2$  son los parámetros que modelan la distorsión tangencial.

Por lo tanto las ecuaciones (5.12) y (5.13) representan el punto de impacto corregido (punto donde hubiera impactado el haz de luz si no hubiesen existido distorsiones).

$$x = x^d + D_x^{Pr} + D_x^{Lr} + D_x^t \quad (5.12)$$

$$y = y^d + D_y^{Pr} + D_y^{Lr} + D_y^t \quad (5.13)$$



## 5.2 Proceso de calibración

Para la realización de la calibración geométrica de sistemas basados en cámaras existen varios métodos que vamos a intentar adaptar y reutilizar para la calibración de nuestro sistema. Estos se pueden dividir en dos grupos, los que utilizan plantillas de calibración 3D y los que utilizan plantillas 2D. También existen métodos 'multi-imagen' que a partir de capturar la imagen de una plantilla desde diferentes posiciones y orientaciones tienen en cuenta la profundidad para calibrar utilizando plantillas 2-D. En nuestro caso la plantilla de calibración estará formada por una matriz de emisores IRED. Esta plantilla tiene la gran ventaja de que podemos orientar todos los IRED hacia el sensor, haciendo que el ángulo de emisión sea pequeño y por tanto la potencia de señal recibida sea mayor, lo que provoca que el SNR de las señales también sea mayor, lo que reduce el error en el cálculo del punto de impacto sobre la superficie del sensor PSD.

De los métodos basados en plantillas 2D [Tsai, 1987] [Batista et al., 1998] [Zhang, 2000] el que mejor se ajusta a nuestras características es el método descrito por Zhang, debido a que los métodos de Tsai y Batista requieren que ciertos valores de parámetros deben ser fijados previamente como el centro óptico, la distancia focal, etc., que se utilizan para la obtención de los demás parámetros. Esto es un gran hándicap, ya que la sujeción de la lente al sensor PSD se realiza mediante métodos mecánicos y el error en los valores de estos parámetros podrían ser considerables y por tanto los resultados de la calibración que dependen de ellos no se ajustarán a la realidad.

Además de lo comentado anteriormente, el método de Zhang es un método flexible, es decir, puedes tomar tantas imágenes como se quiera de la plantilla de calibración sin conocer su posición, y procesarlas todas posteriormente. Es un método robusto debido a que el error debido al ruido de las imágenes puede ser reducido, utilizando mayor número de imágenes, pero presenta la desventaja de que es un método sensible a la distorsión de las imágenes.

El método de Zhang tiene dos etapas, la primera de ellas es una etapa lineal en la cual se obtiene una aproximación de los valores de los parámetros lineales del sistema, es decir todos los parámetros menos los parámetros que modelan las distorsiones, y una segunda etapa que a partir de los datos obtenidos de la primera utiliza métodos iterativos para obtener los parámetros no lineales, así como para optimizar los parámetros lineales.

Debido a que la primera etapa de Zhang es sensible a las distorsiones, ya que se utilizan métodos lineales para un problema no lineal, proponemos en esta tesis incorporar una etapa previa para realizar una corrección preliminar a grosso modo de la distorsión. Además, también se ha añadido una normalización de los datos, que se estima que mejorará el proceso de calibración ante ruido en las imágenes. Estas hipótesis de mejoras se analizarán en la sección de simulaciones para verificar su contribución al proceso de calibración.

En conclusión, el proceso de calibración constará de una corrección preliminar de la distorsión, seguido de la normalización de datos, después la primera etapa del método de Zhang para la obtención de los parámetros lineales de forma aproximada y por último de la segunda etapa de Zhang para obtener y optimizar todos los parámetros del modelo matemático propuesto.

### 5.2.1 Método de calibración

El objetivo de la calibración es obtener los valores de los parámetros del sistema. Ya que el modelo del sistema es un sistema no-lineal, para la resolución del sistema se hará uso de métodos iterativos como pueden ser Gauss-newton, descenso por gradiente, Levenberg-Marquardt, etc. Estas técnicas de resolución de sistemas no lineales presentan el problema de que pueden converger a soluciones que matemáticamente son correctas pero que no se correspondan con la realidad. Esta situación se corrige estableciendo un punto de partida, es decir, estableciendo unos valores de los parámetros que se aproximen a los reales para que el sistema comience a converger desde esos valores, y/o acotando el valor de los parámetros.

En el caso del método de Zhang los valores preliminares se obtienen analíticamente de forma que no es necesario que se sepan los valores aproximados de antemano. Para la obtención de los valores de los parámetros lineales se realizan dos pasos, el primer paso es obtener la matriz de proyección ( $M$ ) resolviendo (5.14) para cada una de las imágenes. A esta forma de obtener la matriz  $M$  se le denomina DLT (Direct Linear Transform) [Sutherland, 1974].

$$\begin{pmatrix} s \cdot x \\ s \cdot y \\ s \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5.14)$$

donde  $(x, y)$  son los puntos de impacto del haz de luz sobre la superficie del sensor PSD,  $X_p, Y_p$  y  $Z_p$  son las coordenadas de la plantilla de calibración, siendo el origen un punto cualquiera (debido a que la plantilla es 2D la coordenada  $Z_p$  en nuestro caso será 0), quedando por tanto la expresión de la siguiente forma:

$$\begin{pmatrix} s \cdot x \\ s \cdot y \\ s \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5.15)$$

donde los parámetros  $m_{ij}$  son los elementos de la matriz  $M$ . Desarrollando el sistema matricial 5.15, podemos expresarlo del siguiente modo:

$$\begin{pmatrix} X_p & Y_p & 1 & 0 & 0 & 0 & -x \cdot X_p & -x \cdot Y_p & -x \\ 0 & 0 & 0 & X_p & Y_p & 1 & -y \cdot X_p & -y \cdot Y_p & -y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{13} \\ m_{21} \\ m_{22} \\ m_{23} \\ m_{31} \\ m_{32} \\ m_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5.16)$$

donde  $X_p$  e  $Y_p$ , son vectores columna con las coordenadas de los puntos de la plantilla, y  $x$  e  $y$ , son vectores columna con los puntos del plano imagen correspondientes a los puntos de la plantilla. Este sistema matricial se resuelve por medio de valores singulares (SVD) y son necesarios 5 puntos como mínimo en la plantilla, debido a que para resolver el sistema son necesarias 9 ecuaciones independientes y por cada punto se obtienen 2 ecuaciones.

Una vez obtenida la matriz de proyección de cada imagen y teniendo en cuenta que la matriz de proyección  $M$ , es:

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & \gamma & C_x \\ 0 & f & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & T_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & T_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & T_z \end{pmatrix} \quad (5.17)$$

Se puede expresar de forma simplificada, dado que la plantilla es bidimensional, como:

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & m_2 & m_3 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

donde  $m_{1,2,3}$  son los vectores columna de la matriz  $M$ , siendo  $A$  la matriz que contiene los parámetros intrínsecos,  $r_1$  y  $r_2$  las dos primeras columnas de la matriz de rotación y  $t$  el vector de traslación.

Como la matriz de rotación debe cumplir que,  $r_1^T r_1 = r_2^T r_2$  y  $r_1^T r_2 = 0$ , ya que,  $r_1$  y  $r_2$  son ortonormales, se obtiene que:

$$m_1^T A^{-T} A^{-1} m_2 = 0 \quad (5.19)$$

$$m_1^T A^{-T} A^{-1} m_1 = m_2^T A^{-T} A^{-1} m_2 \quad (5.20)$$

donde  $A^{-T} A^{-1}$  es la matriz 5.21.

$$B = A^{-T} A^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{f^2} & \frac{-\gamma}{f^3} & \frac{-C_y \gamma - C_x f}{f^2} \\ \frac{-\gamma}{f^3} & \frac{f^2 + \gamma^2}{f^4} & \frac{\gamma(C_x f - C_y \gamma)}{f^4} - \frac{C_y}{f^2} \\ \frac{-C_y \gamma - C_x f}{f^2} & \frac{\gamma(C_x f - C_y \gamma)}{f^4} - \frac{C_y}{f^2} & \frac{(C_y \gamma - C_x f)^2}{f^4} + \frac{C_y^2}{f^2} + 1 \end{pmatrix} \quad (5.21)$$

Para obtener los elementos de la matriz  $B$ , tradicionalmente se utiliza el sistema de ecuaciones (5.22), donde  $V_{ij} = [m_{i1}m_{j1} \ m_{i1}m_{j2} + m_{i2}m_{j1} \ m_{i2}m_{j2} \ m_{i3}m_{j1} + m_{i1}m_{j3} \ m_{i3}m_{j2} + m_{i2}m_{j3} \ m_{i3}m_{j3}]$ , siendo  $m_{ij}$  los elementos de la matriz  $M$  obtenida por DLT. Debido a que la matriz  $B$  es simétrica únicamente es necesario obtener 6 parámetros, y como por cada imagen se obtienen 2 ecuaciones, necesitaremos 3 imágenes, aunque para obtener mejores resultados es recomendable utilizar más imágenes. Este sistema también se resuelve por SVD.

$$\begin{bmatrix} V_{12}^T \\ (V_{11} - V_{22})^T \end{bmatrix} b = 0 \quad (5.22)$$

Una vez obtenido el vector  $b = [b_{11} \ b_{12} \ b_{22} \ b_{13} \ b_{23} \ b_{33}]^T$ , obtendremos los parámetros intrínsecos con las siguientes expresiones:

$$C_y = (b_{12}b_{13} - b_{11}b_{23}) / (b_{11}b_{22} - b_{12}^2) \quad (5.23)$$

$$\eta = b_{33} - (b_{13}^2 + C_y(b_{12}b_{13} - b_{11}b_{23})) / b_{11} \quad (5.24)$$

$$f = \sqrt{\eta / b_{11}} \quad (5.25)$$

$$\gamma = -b_{12}f^3 / \eta \quad (5.26)$$

$$C_x = \eta C_y / f - b_{13}f^2 / \eta \quad (5.27)$$

Y los parámetros extrínsecos:

$$r_1 = \lambda A^{-1} m_1 \quad (5.28)$$

$$r_2 = \lambda A^{-1} m_2 \quad (5.29)$$

$$t = \lambda A^{-1} m_3 \quad (5.30)$$

$$r_3 = r_1 \times r_2 \quad (5.31)$$

donde  $\lambda = \left\| \frac{1}{A^{-1}m_1} \right\| = \left\| \frac{1}{A^{-1}m_2} \right\|$ .

Debido al ruido y la no linealidad de las imágenes, los valores de estos parámetros no serán correctos, pero sí un buen punto de partida para el método iterativo. El siguiente paso, por tanto, es obtener los valores de los parámetros de distorsión, así como optimizar todos los parámetros; para ello se hará uso de métodos iterativos; en nuestro caso hemos optado por Levenberg-Mardquardt.

La expresión (5.32) es la función de coste. Esta se basa en reducir el error entre los puntos de la plantilla y los puntos proyectados, es decir, la diferencia entre los puntos reales de la plantilla y los calculados a partir de los puntos de las imágenes y los valores

de los parámetros.

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|P_j - \hat{P}_j(A, D, R_i, T_i, Q)\|^2 \quad (5.32)$$

donde  $n$  es el número de imágenes,  $m$  el número de puntos por imagen (puntos en la plantilla),  $Q$  los puntos captados en el plano imagen,  $A$  la matriz que contiene los parámetros intrínsecos lineales,  $D$  que contiene los parámetros que modelan las distorsiones,  $R_i$  y  $T_i$  que son la matriz de rotación y el vector de traslación respectivamente de cada posición de la plantilla con respecto al origen del PSD,  $(\hat{P}_j)$  son los puntos proyectados y  $P$  los puntos de la plantilla de calibración.

### 5.2.2 Corrección preliminar de la distorsión

Como se ha mencionado anteriormente, el mayor problema del método de Zhang es la sensibilidad a la distorsión, con lo que en caso de lentes con mucha distorsión es necesario realizar una corrección previa. En [Ahmed and Farag, 2005] se proponen varios métodos orientados a la corrección de la distorsión para cámaras, de todos esos métodos hemos seleccionado el denominado “line straightness method” para adaptarlo al tipo de sensor que vamos a utilizar en esta tesis.

Este método se basa en corregir la distorsión de las imágenes a partir de las rectas de la plantilla de calibración que han sido distorsionadas y por medio de un proceso iterativo obtener los valores de parámetros que modelan la distorsión. En la figura 5.2.a se muestran las coordenadas de la plantilla de calibración y en la figura 5.2.b, esas coordenadas proyectadas en el plano imagen.

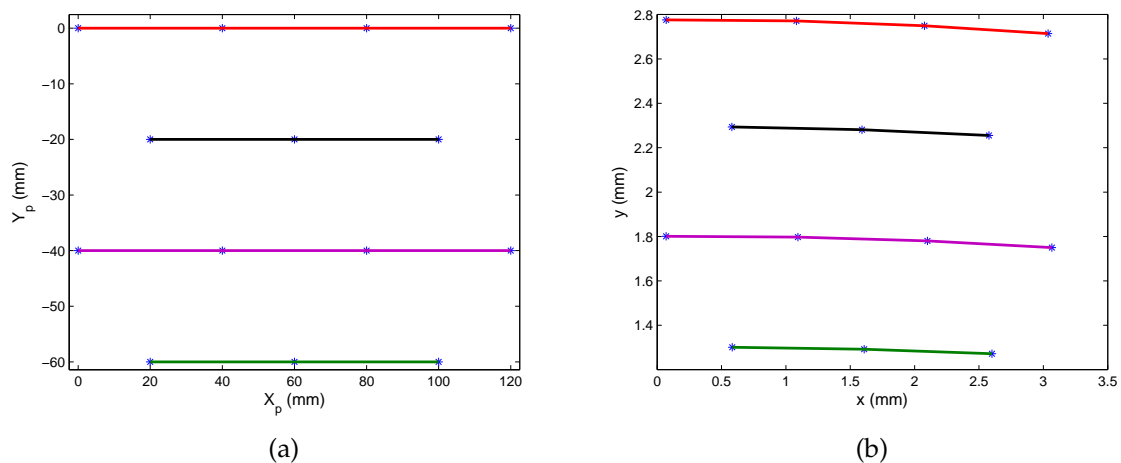


Figura 5.2: Formación de la imagen de la plantilla de calibración; (a) Coordenadas de la plantilla de calibración; (b) Imagen distorsionada en el plano del sensor

En [Ahmed and Farag, 2005] proponen como ejemplo modelar mediante un solo parámetro la distorsión radial y con otro la distorsión tangencial. Debido a que esti-

mamos que la distorsión tangencial afectará muy poco a nuestro sistema, proponemos modelar, para nuestra aplicación, con parámetros de distorsión radial.

En (5.33) se muestra la función de coste a utilizar para conseguir reducir la distorsión, esta se basa en igualar las tangentes en los puntos que forman una curva, debido a que si los puntos perteneciesen a una recta las tangentes serían iguales.

$$f(x) = \sum_{j=1}^L \sum_{i=2}^N \left\| s_j(x_i^d, y_i^d) - s_j(x_{i-1}^d, y_{i-1}^d) \right\|^2 \quad (5.33)$$

En la misma,  $L$  es el número de líneas,  $N$  el número de puntos por cada línea,  $(x^d, y^d)$  las coordenadas de cada punto, y  $S$  la tangente de los puntos, que se calcula del siguiente modo:

$$S(x^d, y^d) = \frac{\frac{\partial x^u}{\partial x^d} + \frac{\partial x^u}{\partial y^d} \frac{\delta y^d}{\delta x^d}}{\frac{\partial y^u}{\partial x^d} + \frac{\partial y^u}{\partial y^d} \frac{\delta y^d}{\delta x^d}} \quad (5.34)$$

donde  $\frac{\delta y^d}{\delta x^d}$  es la pendiente de la tangente en el punto  $(x^d, y^d)$  y las derivadas parciales son:

$$\frac{\partial x^u}{\partial x^d} = k_1 \left( r^2 + 2(C_x - x^d)(C_x - x^d) \right) + 4k_2 \left( r^2 (C_x - x^d)^2 + r^4 \right) + 1 \quad (5.35)$$

$$\frac{\partial y^u}{\partial y^d} = k_1 \left( r^2 + 2(C_y - y^d)(C_y - y^d) \right) + 4k_2 \left( r^2 (C_y - y^d)^2 + r^4 \right) + 1 \quad (5.36)$$

$$\frac{\partial x^u}{\partial y^d} = 2k_1 (C_y - y^d) + 4k_2 r^2 (C_y - y^d)(C_x - x^d) \quad (5.37)$$

$$\frac{\partial y^u}{\partial x^d} = 2k_1 (C_x - x^d) + 4k_2 r^2 (C_y - y^d)(C_x - x^d) \quad (5.38)$$

donde  $r$  es la distancia euclídea entre el punto  $(x^d, y^d)$  y el centro óptico  $(C_x, C_y)$ , este método será analizado junto al método de calibración en la sección de simulación.

### 5.2.3 Normalización de datos

En [Hartley, 1997] se demuestra que la matriz que relaciona los puntos de una plantilla de calibración con su proyección en el plano imagen, es sensible a la posición del plano imagen y al ruido en las imágenes. Para resolver este problema y mantener más estables los resultados se propone obtener la matriz de proyección mejor condicionada que obteniendo la matriz de proyección por DLT. Por lo tanto, partiendo de:

$$Q = MP \quad (5.39)$$

donde  $Q$  son los puntos en el plano imagen,  $M$  la matriz de proyección y  $P$  los puntos de la plantilla, se multiplica  $Q$  por una matriz  $T_Q$  y los puntos de la plantilla ( $P$ ) por una matriz  $T_p$ . Estas matrices  $T_Q$  y  $T_p$  deben cumplir que la plantilla de calibración y su proyección en el plano imagen deben estar centrados en el origen de coordenadas y los puntos deben ser escalados isotrópicamente para que la distancia media hasta el origen sea igual a  $\sqrt{2}$ . Por lo que tenemos que:

$$T_Q Q = M^\circ T_p P \quad (5.40)$$

mediante DLT se obtiene  $M^\circ$  que relaciona  $T_Q Q$  con  $T_p P$ . Una vez obtenido  $M^\circ$ , solo queda resolver (5.41), con la que se obtiene la matriz de proyección real.

$$M = T_Q^{-1} M^\circ T_p \quad (5.41)$$

Para evaluar todo el proceso descrito anteriormente en el apartado 5.3 se muestran una serie de simulaciones a los que se le han añadido diferentes fuentes de error, como son ruido blanco gaussiano en las señales, desequilibrio en los factores de ganancias de las señales de los cuatro canales del PSD y la distorsión del sensor PSD.

#### 5.2.4 Análisis del error

En esta sección, se describe la sensibilidad en la determinación del ángulo de incidencia ante errores en los parámetros del sistema óptico, para demostrar la robustez o debilidad del método ante los diferentes parámetros. Siendo el error la suma del error debido al punto de impacto y al error en el cálculo de la distancia focal:

$$\varepsilon_\alpha = \left| \frac{\partial \alpha_x}{\partial x} \right| \Delta_x + \left| \frac{\partial \alpha_x}{\partial f} \right| \Delta_f \quad (5.42)$$

donde:

$$\left| \frac{\partial \alpha_x}{\partial x} \right| = \left| \frac{f}{f^2 + x^2} \right| \quad (5.43)$$

$$\left| \frac{\partial \alpha_x}{\partial f} \right| = \left| \frac{x}{f^2 + x^2} \right| \quad (5.44)$$

Las figuras 5.3a y 5.3b muestran la sensibilidad con respecto al punto de impacto sobre la superficie del sensor PSD y la focal de la lente.

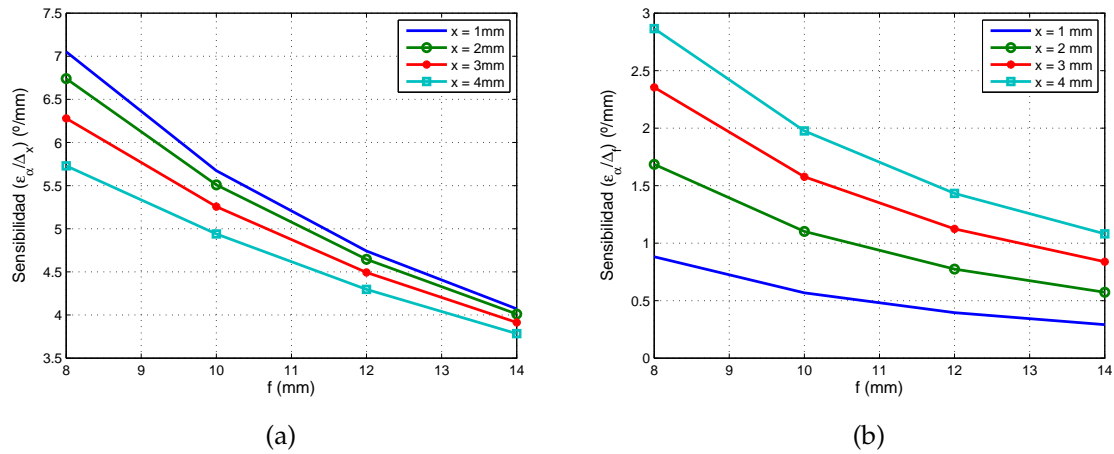


Figura 5.3: Sensibilidad en el cálculo del ángulo de incidencia debido a, (a) Error en el punto de impacto; (b) Error en la focal

Comparando los resultados, se puede comprobar que la sensibilidad al error debido al punto de impacto es mayor que a la debido por la focal de la lente. En nuestro caso un milímetro de error en cualquiera de los dos parámetros es un error grande, que en realidad no se va a dar, debido a la poca distorsión de la lente y además como se verá en el apartado de pruebas experimentales la calibración geométrica realizadas mostrarán que el error en los puntos de impacto son menores y que la focal obtenida de la calibración tiene errores por debajo de 0.1 mm.

### 5.3 Evaluación del método de calibración propuesto

En esta sección se va a evaluar la precisión y la sensibilidad ante diferentes efectos del método de calibración propuesto. Para ello se van a realizar 4 pruebas, la primera de ellas consiste en evaluar las mejoras que introducen la corrección preliminar de la distorsión y la normalización de los datos; en la segunda se evalúa el efecto del ruido en las señales del sensor PSD con diferentes niveles de SNR; en la tercera prueba se evalúa el efecto de los desequilibrios en los factores de ganancia de los amplificadores aisladamente (sin ruido) y en combinación con el efecto del ruido en las señales; y la última prueba consiste en añadir la distorsión del sensor PSD, que igualmente se analizará aisladamente y en combinación con el ruido y los desequilibrios. Finalmente se muestra una sección comparando los resultados ante las diferentes fuentes de error.

Todas estas simulaciones se han realizado con dos tipos de lentes para comprobar que el método de calibración propuesto es robusto en cualquiera de los casos. Siendo la distorsión uno de los problemas importantes, hemos evaluado la calibración con una lente con distorsión pequeña y otra lente con mayor distorsión:

- Lente 1: distancia focal de 25 mm y un parámetro de distorsión radial ( $k_1 = 2 \cdot 10^{-3}$  mm).



- Lente 2: distancia focal de 8 mm y dos parámetros de distorsión radial ( $k_1 = 1 \cdot 10^{-2}$ ,  $k_2 = 3 \cdot 10^{-5}$  mm).

Para las pruebas se han creado imágenes sintéticas a partir de una plantilla de calibración como se muestra en la figura 5.4: Que el diseño de la plantilla de calibración no sea una matriz regular es debido a que al tener pocos puntos, es conveniente no ponerlos todos alineados en las 2 direcciones, ya que esto mejora el cálculo de la matriz de proyección.

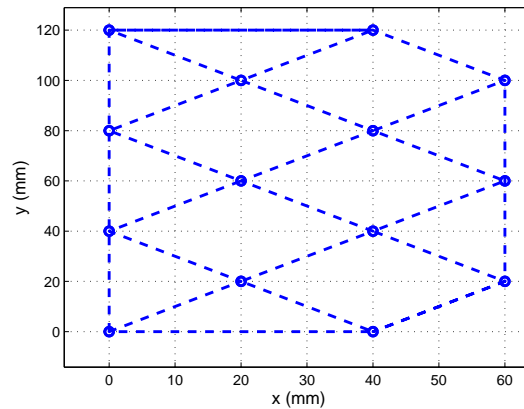


Figura 5.4: Plantilla sintética de calibración 2D para simulaciones

En la figura 5.5.a se muestra el set 1 de imágenes sintéticas que se corresponden con las captadas a través de una lente de 25 mm de distancia focal, situando la plantilla de calibración en diferentes posiciones. En la figura 5.5.b se presenta el set de imágenes que se corresponde con las captadas con una lente de 8 mm de distancia focal. En los dos casos las imágenes han sido generadas con un centro óptico en (0.5, -0.7) mm respecto del centro eléctrico (geométrico). Los valores de los parámetros extrínsecos con los que se ha emulado la prueba han sido escogidos aleatoriamente.

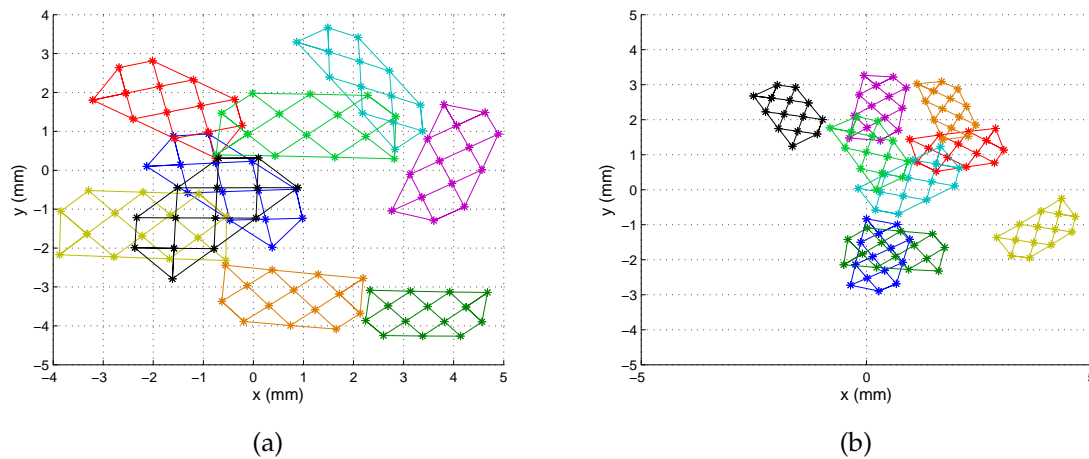


Figura 5.5: Imágenes para calibración; (a) Set de imágenes de la lente 1; (b) Set de imágenes de la lente 2

Es recomendable que entre todas las imágenes utilizadas se cubra la mayor área del sensor posible, debido a que las lentes no son totalmente simétricas y en una calibración real, haciéndolo de esta manera se optimizaría para toda el área del sensor. Para las simulaciones no se va a tener en cuenta el problema de que no es simétrica la lente, por lo tanto, que las imágenes no estén distribuidas por todo el área del sensor PSD, no va a afectar a los resultados.

### 5.3.1 Evaluación de las correcciones preliminares

En este primer apartado vamos a evaluar la corrección preliminar de la distorsión (en las tablas CPD), y la normalización de los datos (en las tablas ND) para ello vamos a comparar los valores de los parámetros intrínsecos resultantes de la primera etapa de calibración, en la que obtenemos los valores iniciales para el método iterativo. En la tabla 5.1 y en la tabla 5.2 se presentan los resultados para la lente 1 y para la lente 2 respectivamente. Se han utilizado las 9 imágenes ideales, es decir, sin ruidos ni desequilibrios en los factores de ganancia de las señales y sin tener en cuenta la distorsión propia del sensor PSD, (estas fuentes de error se evaluarán en las siguientes secciones).

Tabla 5.1: Comparación de los resultados de la 1ª etapa de Zhang, con y sin corrección preliminar de la distorsión y con y sin normalización de datos, para la lente 1.

Lente 1	Ideal	Sin CPD		Con CPD	
		Sin ND	Con ND	Sin ND	Con ND
$C_x(\text{mm})$	0,5	0,33172	0,31600	0,3589	0,2871
$C_y(\text{mm})$	-0,7	-1,5623	-1,5030	-1,3373	-1,3077
$f(\text{mm})$	25	26,2146	25,7406	25,1194	25,1559

Estos resultados indican, que en este caso donde la distorsión de la lente es pequeña, no se detectan diferencias que puedan hacer que el método iterativo posterior no converja en una solución real.

Tabla 5.2: Comparación de los resultados de la 1ª etapa de Zhang, con y sin corrección preliminar de la distorsión y con y sin normalización de datos, para la lente 2.

Lente 2	Ideal	Sin CPD		Con CPD	
		Sin ND	Con ND	Sin ND	Con ND
$C_x(\text{mm})$	0,5	0,5017	0,6585	0,5103	0,5113
$C_y(\text{mm})$	-0,7	-0,7370	-0,6160	-0,7520	-0,7095
$f(\text{mm})$	8	10,4352	11,0650	9,2115	9,1549

En esta segunda lente si se comprueba que en el caso de tener una distorsión mayor si existe una mejora al utilizar la corrección preliminar de la distorsión sobretodo en el cálculo de la focal de lente, sin embargo, la normalización de los datos no produce una mejora significativa, incluso empeora un poco los resultados.

En conclusión, en caso de utilizar lentes con bastante distorsión es aconsejable utilizar algún método para corregir en parte o en su totalidad la distorsión a la hora de obtener los valores iniciales para los métodos iterativos, y en cuanto a la normalización de los datos no se producen mejoras con lo cual no se propone utilizarla de momento.

### 5.3.2 Evaluación del efecto del ruido de las señales del sensor PSD en el proceso de calibración

Para evaluar el efecto del ruido de las señales de salida del sensor PSD en la calibración geométrica, hemos realizado pruebas con valores de SNR entre 30 a 50 dB, suponiendo ruido blanco gaussiano en las señales, con distribución  $(N(\mu, \sigma^2))$ . El tiempo de adquisición de señales utilizado es de 0.05 segundos, a una frecuencia de 80 kHz de la señal a 10 MHz de frecuencia de muestreo.

Los resultados de la calibración dependen además de otras variables como el número de imágenes, los parámetros de la lente y las imágenes tomadas con cada lente (posición de las imágenes en el plano imagen).

En las simulaciones se han utilizado 9 imágenes para las dos lentes. Además, el proceso de calibración se ha realizado con y sin la corrección preliminar de la distorsión para comparar el efecto de estas mejoras. Se ha repetido 200 veces la simulación por cada valor de SNR para obtener los valores medios y de desviación.

La tabla 5.3 muestra los resultados obtenidos de la calibración para la lente 1, en esta tabla se muestran los valores ideales y los obtenidos de la calibración de los parámetros intrínsecos, en los cuales se muestra el valor medio, así como la desviación estándar entre paréntesis, también se muestran los residuos que es el error cuadrático medio de los puntos de las imágenes y los puntos proyectados, es decir los puntos calculados de la optimización de los parámetros intrínsecos y extrínsecos del sistema, así como el número de iteraciones que ha necesitado el método iterativo para converger.

Tabla 5.3: Resultados de la calibración con diferentes SNR en las señales y con la corrección previa de la distorsión y sin ella para la lente 1

Lente 1		Con CPD			Sin CPD		
SNR (dB)	Ideal	30	40	50	30	40	50
$C_x$ (mm)	0.5	0.6581 (0.7162)	0.5062 (0.1551)	0.5060 ( $4,3929 \cdot 10^{-2}$ )	0.7700 (0.6315)	0.5097 (0.1665)	0.4981 ( $4,1426 \cdot 10^{-2}$ )
$C_y$ (mm)	-0.7	-0.7749 (0.5186)	-0.6806 (0.2219)	-0.6920 ( $7,2875 \cdot 10^{-2}$ )	-0.2968 (0.6589)	-0.6844 (0.2574)	-0.7002 ( $7,8348 \cdot 10^{-2}$ )
$f$ (mm)	25	24.9084 (0.4832)	24.9868 (0.1724)	24.9954 ( $5,4405 \cdot 10^{-3}$ )	24.8869 (0.5935)	24.9951 (0.1683)	25.0009 ( $4,7079 \cdot 10^{-2}$ )
$k_1$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2.0140 \cdot 10^{-3}$ ( $2,0461 \cdot 10^{-4}$ )	$1.9962 \cdot 10^{-3}$ ( $4,8222 \cdot 10^{-5}$ )	$2.0014 \cdot 10^{-3}$ ( $1,5197 \cdot 10^{-5}$ )	$1.9207 \cdot 10^{-3}$ ( $2,4786 \cdot 10^{-4}$ )	$1.9957 \cdot 10^{-3}$ ( $5,1903 \cdot 10^{-5}$ )	$1.9961 \cdot 10^{-3}$ ( $1,5991 \cdot 10^{-5}$ )
$k_2$	0	$1.3808 \cdot 10^{-6}$ ( $7,9395 \cdot 10^{-6}$ )	$5.2682 \cdot 10^{-8}$ ( $1,5151 \cdot 10^{-6}$ )	$4.4839 \cdot 10^{-8}$ ( $4,4062 \cdot 10^{-7}$ )	$2.5099 \cdot 10^{-6}$ ( $9,5927 \cdot 10^{-6}$ )	$5.4053 \cdot 10^{-8}$ ( $1,2615 \cdot 10^{-6}$ )	$2.9584 \cdot 10^{-8}$ ( $4,2352 \cdot 10^{-7}$ )
Residuos (mm)	0	1.1286 (0.1116)	0.1127 ( $1,0592 \cdot 10^{-2}$ )	$1.1434 \cdot 10^{-2}$ ( $1,2037 \cdot 10^{-3}$ )	1.1246 (0.10750)	0.1140 ( $1,1194 \cdot 10^{-2}$ )	$1.1523 \cdot 10^{-2}$ ( $1,1441 \cdot 10^{-3}$ )
Iteraciones	-	32.66 (16.08)	35.62 (12.04)	19.06 (3.8778)	52.97 (19.37)	47.62 (6.93)	28.38 (9.04)

De los resultados obtenidos en esta simulación se puede concluir que con menos de 40 dB de SNR el error es grande tanto con la corrección preliminar como sin ella, con la diferencia de que con la corrección preliminar el número de iteraciones es menor, debido a que el punto de partida es más próximo a los valores finales como se comprobó en la anterior simulación.

También se comprueba que a partir de 40 dB el error medio es parecido, sin embargo, la desviación típica si desciende considerablemente con el aumento del SNR.

De igual forma que para la lente 1, en la tabla 5.4 se muestran los resultados obtenidos de la calibración para la lente 2, cuando las señales están contaminadas de ruido, comparando los resultados obtenidos cuando se realiza la corrección preliminar de la distorsión y cuando no.

Tabla 5.4: Resultados de la calibración con diferentes SNR en las señales y con la corrección previa de la distorsión y sin ella para la lente 2

Lente 2		Con CPD			Sin CPD		
SNR (dB)	Ideal	30	40	50	30	40	50
$C_x$ (mm)	0.5	0.5248 ( $9,9308 \cdot 10^{-2}$ )	0.5015 ( $2,7468 \cdot 10^{-2}$ )	0.5001 ( $9,7033 \cdot 10^{-3}$ )	0.5173 (0.1247)	0.4984 ( $3,6729 \cdot 10^{-2}$ )	0.4995 ( $1,1802 \cdot 10^{-2}$ )
$C_y$ (mm)	-0.7	-0.6579 (0.1297)	-0.6975 ( $3,6233 \cdot 10^{-2}$ )	-0.6977 ( $1,0635 \cdot 10^{-2}$ )	-0.6431 (0.1238)	-0.6896 ( $3,9594 \cdot 10^{-2}$ )	-0.6984 ( $1,1298 \cdot 10^{-2}$ )
$f$ (mm)	8	8.1090 (0.3833)	8.0213 (0.1061)	7.9961 ( $3,9105 \cdot 10^{-2}$ )	8.0267 (0.4084)	7.9991 (0.1297)	7.9968 ( $4,0700 \cdot 10^{-2}$ )
$k_1$	$1 \cdot 10^{-2}$	$9.9109 \cdot 10^{-3}$ ( $3,4371 \cdot 10^{-4}$ )	$9.9923 \cdot 10^{-3}$ ( $1,0460 \cdot 10^{-4}$ )	$9.9992 \cdot 10^{-3}$ ( $3,5837 \cdot 10^{-5}$ )	$0.9873 \cdot 10^{-3}$ ( $3,6840 \cdot 10^{-4}$ )	$0.9987 \cdot 10^{-3}$ ( $1,0071 \cdot 10^{-4}$ )	$9.9982 \cdot 10^{-3}$ ( $3,1988 \cdot 10^{-5}$ )
$k_2$	$3 \cdot 10^{-5}$	$2.4701 \cdot 10^{-5}$ ( $1,4913 \cdot 10^{-5}$ )	$2.4541 \cdot 10^{-4}$ ( $4,2144 \cdot 10^{-6}$ )	$2.9964 \cdot 10^{-5}$ ( $1,4822 \cdot 10^{-6}$ )	$2.3909 \cdot 10^{-5}$ ( $1,4521 \cdot 10^{-5}$ )	$2.9938 \cdot 10^{-5}$ ( $4,8994 \cdot 10^{-6}$ )	$3.0155 \cdot 10^{-5}$ ( $1,4209 \cdot 10^{-6}$ )
Residuos (mm)	0	1.3890 (0.1491)	0.1398 ( $1,3390 \cdot 10^{-2}$ )	$1.3961 \cdot 10^{-2}$ ( $1,3622 \cdot 10^{-3}$ )	1.4080 (0.1361)	0.1404 ( $1,4854 \cdot 10^{-2}$ )	$1.4182 \cdot 10^{-2}$ ( $1,3964 \cdot 10^{-5}$ )
Iteraciones	-	23.44 (16.08)	15.72 (12.04)	11.64 (3.8778)	41.72 (19.37)	40.98 (6.93)	42.40 (9.04)

Al igual que como había sucedido con la lente 1, el número de iteraciones es mucho menor cuando se utiliza la corrección preliminar de la distorsión, además ocurre lo mismo con el error medio que se mantiene estable a partir de 40 dB de SNR, pero con la desviación típica menor cuando la SNR aumenta.

Como conclusión a estos resultados, se puede establecer que por encima de los 40 dB de SNR la calibración geométrica funciona correctamente, y que utilizar o no la corrección preliminar afecta fundamentalmente al número de iteraciones que el método iterativo tarda en converger, siendo los resultados de los parámetros intrínsecos iguales. En cuanto a las diferencias entre la lente con poca distorsión y la otra lente con más distorsión son mínimas, es decir, el método de calibración se ha comportado de igual forma.

### 5.3.3 Evaluación del efecto de los desequilibrios en los factores de ganancia en la calibración

Otra fuente de error son las diferencias en los factores de ganancias debidas a los diferentes valores que toman los componentes electrónicos, como se vio en el capítulo 4. Para la simulación se han seleccionado tolerancias del 1 % y del 5 % para las resistencias y los condensadores respectivamente, con valores nominales de 50 k $\Omega$  para la resistencia y 33 pF para el condensador. Siendo (4.1) la que define el factor de ganancia. El valor del factor de ganancia es de 27331.65 con los valores comentados anteriormente a 80 kHz y debido a las tolerancias la variación en el factor de ganancia de  $\pm 768.96$ .

Para la simulación se ha asumido que la variación del factor de ganancia de cada canal seguía una distribución uniforme  $U[a, b]$ . También se han realizado pruebas teniendo en cuenta esta fuente de error junto a ruido blanco gaussiano ( $N(\mu, \sigma^2)$ ).

Por cada caso, se han realizado 200 repeticiones del proceso de calibración obteniendo los resultados que se muestran en las tablas 5.5 y 5.6 para la lente 1 y 2 respectivamente, donde en la columna con el encabezado “Sin ruido” solo se tiene en cuenta los desequilibrios en los factores de ganancia y en las columnas con el encabezado de “40 dB” y “50 dB” teniendo en cuenta los desequilibrios y el ruido. Como en el apartado anterior en cada celda se muestra el valor medio y entre paréntesis la desviación estándar.

Tabla 5.5: Evaluación del método de calibración con desequilibrios en los factores de ganancias y ruidos para la lente 1.

Desequilibrios	Lente 1			
	Ideal	40 dB	50 dB	Sin ruido
$C_x$ (mm)	0.5	0.5463 (1.1246)	0.4859 (1.1184)	0.5284 (1.0543)
$C_y$ (mm)	-0.7	-0.7627 (1.2792)	-0.7442 (1.1955)	-0.6862 (1.0025)
$f$ (mm)	8	24.5821 (0.4489)	24.7798 (0.3366)	24.7831 (0.2916)
$k_1$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2.008 \cdot 10^{-3}$ ( $5,5946 \cdot 10^{-5}$ )	$1.9911 \cdot 10^{-3}$ ( $4,9795 \cdot 10^{-5}$ )	$1.9964 \cdot 10^{-3}$ ( $3,0805 \cdot 10^{-5}$ )
$k_2$	0	$6.3620 \cdot 10^{-7}$ ( $1,7950 \cdot 10^{-6}$ )	$8.9598 \cdot 10^{-8}$ ( $1,2040 \cdot 10^{-6}$ )	$3.3083 \cdot 10^{-8}$ ( $1,1553 \cdot 10^{-6}$ )
Residuos (mm)	0	$6.1689 \cdot 10^{-2}$ ( $1,2298 \cdot 10^{-2}$ )	$5.1177 \cdot 10^{-2}$ ( $5,1542 \cdot 10^{-3}$ )	$4.8745 \cdot 10^{-2}$ ( $3,9578 \cdot 10^{-3}$ )
Iteraciones	-	35.72 (9.85)	24.19 (10.86)	24.72 (10.40)

Como se comprueba de los resultados, cuando existen desequilibrios en los factores de ganancia, los resultados en los valores de los parámetros son muy variables, sobretodo en cuanto al centro óptico. Esto es debido a que cuando mayor el factor de ganancia de un canal, los puntos de impacto se desplazan hacia ese canal y por tanto se traduce en una traslación de todos los puntos en el plano imagen.

Otra conclusión, es que cuando se añade ruido a las señales, además de los desequilibrios en los factores de ganancia, el error medio se ve incrementado, y la desviación típica lo hace aún más.

Tabla 5.6: Evaluación del método de calibración con desequilibrios en los factores de ganancias y ruidos para la lente 2.

Desequilibrios	Lente 2			
	Ideal	40 dB	50 dB	Sin ruido
$C_x$ (mm)	0.5	0.5383 (0.3093)	0.4881 (0.3005)	0.4972 (0.2963)
$C_y$ (mm)	-0.7	-0.7078 (0.3339)	-0.6543 (0.2862)	-0.6723 (0.2774)
$f$ (mm)	8	7.9301 (0.1746)	7.9546 (0.1036)	7.9816 (0.1066)
$k_1$	$1 \cdot 10^{-2}$	$0.9950 \cdot 10^{-2}$ ( $1,4376 \cdot 10^{-4}$ )	$1.012 \cdot 10^{-3}$ ( $1,3249 \cdot 10^{-4}$ )	$0.9997 \cdot 10^{-2}$ ( $1,2099 \cdot 10^{-4}$ )
$k_2$	$3 \cdot 10^{-5}$	$2.9671 \cdot 10^{-5}$ ( $5,7399 \cdot 10^{-6}$ )	$2.9786 \cdot 10^{-5}$ ( $5,0512 \cdot 10^{-6}$ )	$2.8683 \cdot 10^{-5}$ ( $4,7542 \cdot 10^{-6}$ )
Residuos (mm)	0	$4.6661 \cdot 10^{-2}$ ( $3,2799 \cdot 10^{-3}$ )	$3.9131 \cdot 10^{-2}$ ( $2,5302 \cdot 10^{-3}$ )	$2.3292 \cdot 10^{-2}$ ( $2,7743 \cdot 10^{-3}$ )
Iteraciones	-	17.08 (0.1710)	12.87 (7.5334)	10.97 (3.20)

En el caso de la lente con más distorsión el desequilibrio en los factores de ganancia también afecta a los parámetros intrínsecos; sin embargo, en este caso las desviaciones son menores que en el caso de la lente 1.

En resumen, estos resultados indican que en el caso de diferencias en los factores de ganancia esto produce errores en la medición de los valores de los parámetros siendo el centro óptico el que sufre mayor error. En cuanto al error producido cuando tenemos en cuenta los desequilibrios junto al ruido, los resultados muestran que las diferencias son pequeñas. Esto demuestra que los factores de ganancia son una fuente de error que no puede ser asumida y por tanto, antes de realizar la calibración geométrica hay que realizar la calibración eléctrica, en el caso de que los componentes utilizados no sean de gran fidelidad.

### 5.3.4 Análisis de la distorsión del sensor PSD en el método de calibración

En esta sección, vamos a analizar el efecto que tiene la distorsión del sensor PSD, que es característica del tipo de sensor PSD que se utilice. Para nuestras pruebas, hemos utilizado como ejemplo el sensor PSD de Hamamatsu S5991-01, siendo este de tipo pin-cushion, que como se explica en [Johnson and Lentz, 2003], la distorsión es aproximadamente de 1 % del tamaño del sensor, siendo el centro de dicha distorsión es el centro del sensor.

La distorsión producida por el sensor PSD es opuesta al efecto de la distorsión producida por la lente que utilizamos en nuestro sistema, siendo la del sensor PSD tipo cojín y la de la lente tipo barril, con lo que en el caso de que los centros de estas distorsiones coincidiesen o fuesen muy próximas entre sí, la distorsión total del sistema

se vería reducida. Sin embargo, si estos no coinciden los errores en el cálculo de los parámetros del sistema se verán afectados.

Para la simulación del efecto de la distorsión del sensor PSD, se va a modelar dicha distorsión con un solo parámetro de valor  $-1.3058 \cdot 10^{-3}$  que se corresponde al 1 % del tamaño del sensor PSD. Como en los anteriores casos las simulaciones se realizarán para los dos tipos de lentes, con el efecto de la distorsión del sensor PSD únicamente, con la distorsión junto a los desequilibrios y en combinación con AWGN en el caso de un SNR de 40 dB.

La Tabla 5.7 muestra los valores de los parámetros intrínsecos para la lente 1 y como en los anteriores casos se muestran los valores medios de 200 iteraciones para cada caso y mostrando la desviación típica entre paréntesis.

Tabla 5.7: Evaluación del método de calibración ante distorsión en el sensor PSD y en combinación con los desequilibrios en los factores de ganancia y los ruidos para la lente 1

	Ideal	Distorsión PSD	Distorsión PSD y SNR 40 dB	Distorsión PSD y Desequilibrios	Distorsión PSD, Desequilibrios y SNR 40dB
$C_x(\text{mm})$	0.5	0.5016	0.4812 (0.1564)	0.4105 (1.4487)	0.3840 (1.5763)
$C_y(\text{mm})$	-0.7	-0.7034	-0.6817 (0.1216)	-0.7933 (1.4161)	-0.8345 (1.5071)
$f(\text{mm})$	25	25.0412	25.0543 (0.1403)	24.8257 (0.1965)	24.8345 (0.2575)
$k_1$	$6.9416 \cdot 10^{-4}$	$6.9525 \cdot 10^{-4}$	$6.8486 \cdot 10^{-4}$ ( $2,9148 \cdot 10^{-5}$ )	$6.9778 \cdot 10^{-4}$ ( $1,5191 \cdot 10^{-5}$ )	$6.9800 \cdot 10^{-4}$ ( $3,2099 \cdot 10^{-5}$ )
$k_2$	0	$6.6503 \cdot 10^{-9}$	$2.7347 \cdot 10^{-7}$ ( $8,0904 \cdot 10^{-7}$ )	$9.0506 \cdot 10^{-8}$ ( $2,4403 \cdot 10^{-7}$ )	$9.9325 \cdot 10^{-8}$ ( $5,9951 \cdot 10^{-7}$ )
Residuos (mm)	0	$2.4690 \cdot 10^{-6}$	$1.0088 \cdot 10^{-2}$ ( $9,9455 \cdot 10^{-3}$ )	$2.5190 \cdot 10^{-3}$ ( $3,0651 \cdot 10^{-3}$ )	0.1026 ( $1,1644 \cdot 10^{-2}$ )
Iteraciones	-	15	31.80 (10.29)	34.52 (13.60)	35.14 (15.4214)

\*En este test, el parámetro  $k_1$  es la contribución de la distorsión de la lente y la distorsión del sensor PSD, siendo el valor ideal  $6.9416 \cdot 10^{-4}$ .

Los resultados obtenidos indican que el efecto de la distorsión del sensor PSD en este caso no afectan al método de calibración, ya que la distorsión de la lente es mayor que la del sensor PSD, en caso de utilizar otro tipo de sensor PSD, y que este tenga mayor distorsión se puede hacer una corrección de la distorsión del sensor PSD previa al proceso de calibración.

En la tabla 5.8 se muestran los resultados para la lente 2 en los mismos casos que para la lente 1.



Tabla 5.8: Evaluación del método de calibración ante distorsión en el sensor PSD y en combinación con los desequilibrios en los factores de ganancia y los ruidos para la lente 2.

	Ideal	Distorsión PSD	Distorsión PSD y SNR 40 dB	Distorsión PSD y Desequilibrios	Distorsión PSD, Desequilibrios y SNR 40dB
$C_x(\text{mm})$	0.5	0.5039	0.5013 ( $3.1690 \cdot 10^{-2}$ )	0.4842 (0.3306)	0.5048 (0.3733)
$C_y(\text{mm})$	-0.7	-0.6993	-0.6926 ( $4.3307 \cdot 10^{-2}$ )	-0.7254 (0.3232)	-0.6807 (0.3158)
$f$	8	8.0146	8.0175 (0.1441)	7.9482 (0.2061)	8.1176 (0.3547)
$k_1$	$8.6941 \cdot 10^{-3}$	$8.7203 \cdot 10^{-3}$	$8.7065 \cdot 10^{-3}$ ( $1,0378 \cdot 10^{-4}$ )	$8.7226 \cdot 10^{-3}$ ( $1,2086 \cdot 10^{-4}$ )	$8.5761 \cdot 10^{-3}$ ( $8,6034 \cdot 10^{-4}$ )
$k_2$	$3 \cdot 10^{-5}$	$2.9893 \cdot 10^{-5}$	$2.9708 \cdot 10^{-5}$ ( $4,0140 \cdot 10^{-6}$ )	$2.8592 \cdot 10^{-5}$ ( $4,5308 \cdot 10^{-6}$ )	$2.8139 \cdot 10^{-5}$ ( $6,5081 \cdot 10^{-6}$ )
Residuos (mm)	0	$5.8242 \cdot 10^{-5}$	$1.2502 \cdot 10^{-2}$ ( $1,2933 \cdot 10^{-2}$ )	$1.6771 \cdot 10^{-2}$ ( $1,8478 \cdot 10^{-2}$ )	$3.5957 \cdot 10^{-4}$ ( $1,8663 \cdot 10^{-3}$ )
Iteraciones	-	10	13.81 (4.85)	11.44 (1.53)	16.19 (8.62)

\*Como en el caso anterior,  $k_1$  es la contribución de las dos distorsiones siendo en este caso el valor ideal de  $8,6941 \cdot 10^{-3}$ .

En este caso, igual que en el caso de la lente 1, la distorsión del sensor PSD afecta poco a los parámetros intrínsecos, con lo que se concluye que en el caso de utilizar sensores PSD con poca distorsión esta afectará poco al error final obtenido

### 5.3.5 Conclusiones de las simulaciones

En este apartado, se van a comparar los resultados obtenidos de las diferentes simulaciones. En la tabla 5.9 se comparan los resultados de la lente 1 y en la tabla 5.10 los resultados de la lente 2.

Como se esperaba, los resultados confirman que el peor caso es cuando se introducen todas las fuentes de error. Sin embargo, los desequilibrios en los factores de ganancia constituyen la mayor fuente de error, es por ello que es necesario realizar una calibración eléctrica del sistema como se describe en el capítulo anterior, demostrándose de nuevo aquí la importancia de ese paso.

En el caso de haber realizado la calibración eléctrica y por tanto que los desequilibrios en los factores de ganancia no afecten al sistema, el caso más realista es cuando se combinan el efecto de la distorsión del sensor PSD y AWGN.

Tabla 5.9: Comparación de los resultados para la lente 1.

	Ideal	SNR 40 dB	SNR 40 dB y desequilibrios	SNR 40 dB y distorsión PSD	SNR 40 dB, desequilibrios y distorsión PSD	SNR 50 dB y distorsión PSD (Caso práctico)
$C_x(\text{mm})$	0.5	0.5062 (0.1551)	0.5463 (1.1246)	0.4812 (0.1564)	0.3840 (1.5763)	0.5060 ( $4,3929 \cdot 10^{-2}$ )
$C_y(\text{mm})$	-0.7	-0.6806 (0.2219)	-0.7627 (1.2792)	-0.6817 (0.1216)	-0.8345 (1.5071)	-0.6920 ( $7,2875 \cdot 10^{-2}$ )
$f(\text{mm})$	25	24.9868 (0.1724)	24.5821 (0.4489)	25.0543 (0.1403)	24.8345 (0.2575)	24.9954 ( $5,4405 \cdot 10^{-3}$ )
$k_1$	*	$1.9962 \cdot 10^{-3}$ ( $4,8222 \cdot 10^{-5}$ )	$-2.008 \cdot 10^{-3}$ ( $5,5946 \cdot 10^{-5}$ )	$6.8486 \cdot 10^{-4}$ ( $2,9148 \cdot 10^{-5}$ )	$6.9800 \cdot 10^{-4}$ ( $3,2099 \cdot 10^{-5}$ )	$6.93531 \cdot 10^{-4}$ ( $9,0483 \cdot 10^{-6}$ )
$k_2$	0	$5.2682 \cdot 10^{-8}$ ( $1,5151 \cdot 10^{-6}$ )	$6.3620 \cdot 10^{-7}$ ( $1,7950 \cdot 10^{-6}$ )	$2.7347 \cdot 10^{-7}$ * ( $8,0904 \cdot 10^{-7}$ )	$9.9325 \cdot 10^{-8}$ * ( $5,9951 \cdot 10^{-7}$ )	$3.8829 \cdot 10^{-8}$ ( $2,5433 \cdot 10^{-7}$ )
Residuos (mm)	0	0.1127 ( $1,0592 \cdot 10^{-2}$ )	$6.1689 \cdot 10^{-2}$ ( $1,2298 \cdot 10^{-2}$ )	$1.0088 \cdot 10^{-4}$ ( $9,9455 \cdot 10^{-3}$ )	0.1026 ( $1,0604 \cdot 10^{-2}$ )	$1 \cdot 10^{-2}$ ( $1,2037 \cdot 10^{-3}$ )
Iteraciones	-	35.62 (12.04)	35.72 (9.85)	31.80 (10.29)	35.14 (15.42)	15.05 (0.93)

\* En este caso la distorsión es de  $2 \cdot 10^{-3}$  en los casos donde no se tiene en cuenta la distorsión del sensor PSD y para los que si se tiene en cuenta la distorsión es de  $6.9416 \cdot 10^{-4}$ .

En esta tabla 5.9 se muestra claramente que los mayores errores vienen dados por disequilibrios en los factores de ganancia, siempre y cuando el SNR de las señales sea 40 dB o mayor, ya que como se mostró cuando el SNR es de 30 dB el error que se produce es inasumible.

Tabla 5.10: Comparación de los resultados de las diferentes pruebas realizadas para la lente 2

	Ideal	SNR 40 dB	SNR 40 dB y desequilibrios	SNR 40 dB y distorsión PSD	SNR 40 dB, desequilibrios y distorsión PSD	SNR 50 dB y distorsión PSD (Caso práctico)
$C_x(\text{mm})$	0.5	0.5015 ( $2.7468 \cdot 10^{-2}$ )	0.5383 (0.3093)	0.5013 ( $3.1690 \cdot 10^{-2}$ )	0.5048 (0.3733)	0.5001 ( $9.7033 \cdot 10^{-3}$ )
$C_y(\text{mm})$	-0.7	-0.6975 ( $3,6233 \cdot 10^{-2}$ )	-0.7078 (0.3339)	-0.6926 ( $4,3307 \cdot 10^{-2}$ )	-0.6807 (0.3158)	-0.6977 ( $1,0635 \cdot 10^{-2}$ )
$f(\text{mm})$	8	8.0213 (0.1061)	7.9301 (0.1746)	8.0175 (0.1441)	8.1176 (0.3547)	7.9961 ( $3,9105 \cdot 10^{-2}$ )
$k_1$	*	$9.9923 \cdot 10^{-3}$ ( $1,0460 \cdot 10^{-4}$ )	$9.9503 \cdot 10^{-3}$ ( $1,4376 \cdot 10^{-4}$ )	$8.7065 \cdot 10^{-3}$ ( $1,0378 \cdot 10^{-4}$ )	$8.5761 \cdot 10^{-3}$ ( $8,6034 \cdot 10^{-4}$ )	$8.7192 \cdot 10^{-2}$ ( $3,1025 \cdot 10^{-5}$ )
$k_2$	$3 \cdot 10^{-5}$	$2.4541 \cdot 10^{-5}$ ( $4,2144 \cdot 10^{-6}$ )	$2.9671 \cdot 10^{-5}$ ( $5,7399 \cdot 10^{-6}$ )	$2.9708 \cdot 10^{-5}$ ( $4,0140 \cdot 10^{-6}$ )	$2.8139 \cdot 10^{-5}$ ( $6,5081 \cdot 10^{-6}$ )	$3.0093 \cdot 10^{-2}$ ( $1,1896 \cdot 10^{-6}$ )
Residuos (mm)	0	0.1398 ( $1,3390 \cdot 10^{-2}$ )	$4.6661 \cdot 10^{-2}$ ( $3,2799 \cdot 10^{-3}$ )	$1.2502 \cdot 10^{-2}$ ( $1,2933 \cdot 10^{-2}$ )	$3.5957 \cdot 10^{-4}$ ( $1,8663 \cdot 10^{-3}$ )	$1.3961 \cdot 10^{-2}$ ( $1,3622 \cdot 10^{-3}$ )
Iteraciones	-	15.72 (2.75)	17.08 (7.5334)	13.81 (4.85)	16.19 (8.62)	10.60 (0.695)

\*En este caso la distorsión es de  $1 \cdot 10^{-2}$  y  $3 \cdot 10^{-5}$  en los casos donde no se tiene en cuenta la distorsión del sensor PSD y para los que si se tiene en cuenta la distorsión es de  $8.6941 \cdot 10^{-4}$ .

Con la lente 2 ocurre lo mismo que con la lente 1 siendo el efecto de los disequili-

brios el que mayor error produce en la calibración del sistema.

En conclusión, el método propuesto converge a una solución real, la cual será una solución buena en caso de que los desequilibrios en los factores de ganancia sean muy reducidos (calibración eléctrica), la distorsión del sensor PSD sea pequeña (o se corrija junto al resto de parámetros en el proceso de calibración) y la SNR sea mayor a 40 dB; en caso de tener mucho ruido aumentando el número de imágenes mejorarían los resultados.

En esta sección se han evaluado las fuentes de error más problemáticas, pero existen otras fuentes de error las cuales no han sido modeladas que también afectarían a la calibración, como pueden ser un mal acoplamiento entre la lente y el sensor PSD (distorsión tangencial), lentes asimétricas o problemas en la fabricación del sensor PSD, como puede ser que las capas que lo forman no sean uniformes.

## 5.4 Pruebas experimentales

Para la calibración, se ha utilizado una plantilla de calibración 2D con 14 IREDs SFH-4233 de OSRAM, como se muestran en la figura 5.6. Para el encendido y apagado de los IREDs se hizo uso de una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments PCI-6289. La señal emitida fue una sinusoidal a 80 kHz generada por un generador de funciones AFG-3022B de Tektronix.

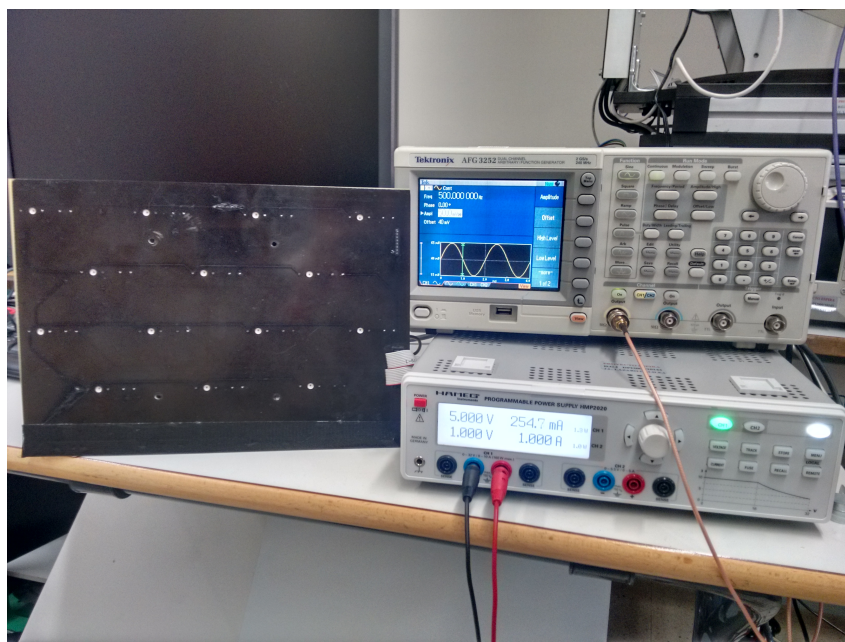


Figura 5.6: Plantilla de calibración, generador de señales y fuente alimentación.

Para obtener las diferentes imágenes, se ha hecho uso del soporte automatizado que se muestra en la figura 5.7, el cual tiene 5 grados de libertad, 3 de traslación y 2 de rotación. La primera calibración se ha realizado con la lente ACL25416U-B de Thorlabs

la cual tiene una focal de  $16 \pm 8\%$  mm y 1 pulgada de diámetro, esta lente debido a que presenta una focal grande, la distorsión y el FoV serán pequeños. La segunda calibración ha sido realizada con un grupo de lente de spacecom JF7.5M-2 con una focal de 7.5 mm y un FoV de  $50^\circ$ , siendo apreciable su distorsión.

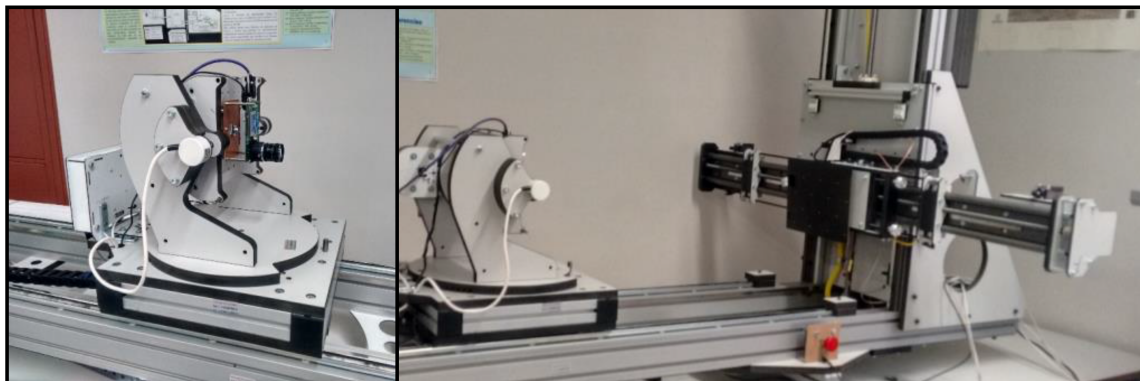


Figura 5.7: Soporte de pruebas automatizado con 5 grados de libertad

Para la primera lente, la cual tienen una focal de 16 mm y poca distorsión, se usaron 9 imágenes que cubrían toda la superficie del sensor PSD, en diferentes posiciones y ángulos, como se muestran en la figura 5.8, (solo se muestran 6 de las 9 imágenes captadas y utilizadas, por claridad de la presentación).

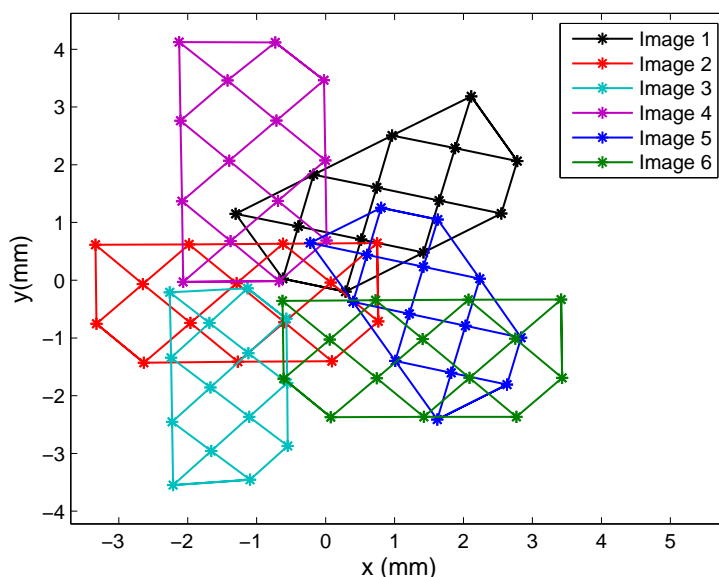


Figura 5.8: Set de imágenes para la lente ACL25416U-B.

La calibración geométrica se va a realizar con la calibración eléctrica realizada previamente, y sin esta, para comparar el efecto de la calibración eléctrica en los parámetros del sistema. En la tabla 5.11 se muestran los valores obtenidos de los parámetros intrínsecos, así como los residuos y el número de iteraciones que ha necesitado el método iterativo para converger a la solución. En ambos casos se han utilizado 9 imágenes.

Tabla 5.11: Comparativa de los resultados de la calibración geométrica para la lente Thorlabs ACL25416U-B con y sin calibración eléctrica

	Con calibración eléctrica	Sin calibración eléctrica
Residuos (mm)	0.6998	1.1358
$C_x$ (mm)	-0.2016	-0.5031
$C_y$ (mm)	0.0803	-0.3846
$f$ (mm)	15.6451	23.3614
$\gamma$	0.2120	1.2777
$k_1$	$5.1806 \cdot 10^{-3}$	$4.7283 \cdot 10^{-3}$
$k_2$	$-1.4308 \cdot 10^{-4}$	$-84198 \cdot 10^{-5}$
$p_1$	$-5.6160 \cdot 10^{-4}$	$3.3597 \cdot 10^{-3}$
$p_2$	$6.5197 \cdot 10^{-4}$	$4.1374 \cdot 10^{-5}$
Iteraciones	19	42

Los resultados obtenidos de las calibraciones geométricas indican que en caso de no realizar una calibración eléctrica los errores en los valores de los parámetros intrínsecos son considerables y por tanto los parámetros intrínsecos obtenidos no se ajustan a la realidad.

Para comprobar que los parámetros obtenidos se ajustan a la realidad, ya que, los métodos de calibración pueden converger a una solución que matemáticamente sea posible, pero no la real, se han realizado una prueba en la cual vamos a calcular la distancia focal. La prueba ha consistido en realizar con el soporte automatizado una espiral de 300x400 mm de exterior, la proyección de este rectángulo en el plano imagen se muestra en la figura 5.9.

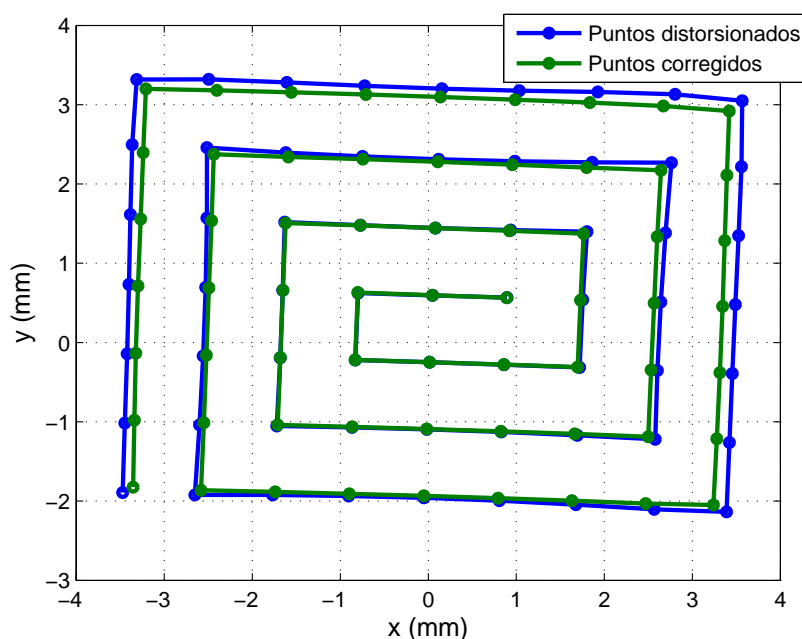


Figura 5.9: Corrección distorsión de la lente ACL25416U-B

Las dimensiones de los lados externos de la espiral en el plano imagen han sido de 6.8664 mm para el lado de abajo de la espiral, de 5.2127 mm para el lado izquierdo, de 6.8855 mm para el lado superior y de 5.1885 mm para el lado derecho.

Una vez conocidos las distancias entre los puntos tanto en el entorno como en el plano imagen se va a hacer uso de la ecuación 5.45, para el calculo de la distancia focal.

$$f = \frac{H}{h} S \quad (5.45)$$

donde  $f$  es la distancia focal,  $H$  es la distancia entre dos puntos en el entorno,  $h$  es la distancia en el plano imagen de los mismo puntos, y  $S$  es la distancia entre el receptor y el emisor. La distancia a la cual se realizo está prueba fue de  $900 \pm 1$  mm, que es el error del encoder del soporte automatizado con el cual se realizo esta prueba. Por lo tanto las focales obtenidas de cada uno de los lados del rectángulo fueron 15.4493 mm para la distancia entre los dos puntos inferiores de la espiral, 15.6380 mm para la distancia entre los puntos de la izquierda, 15.4925 mm para la distancia superior y de 15.5655 mm para la distancia entre los puntos de la derecha.

Como se comprueba la distancia focal obtenida del proceso de calibración fue de 15.6451 mm (tabla 5.11) y las obtenidas por este método han sido valores muy cercanos. Además hay que hacer notar que en el calculo de las distancias entre los puntos en el plano imagen, están involucrados los parámetros de centro óptico y distorsión de la lente.

De igual forma pero para el caso de la lente JF7.5M-2 en la figura 5.10 se muestran 9 imágenes de las 12 que se tomaron para la calibración, y en la tabla 5.12 se muestran los valores obtenidos para los parámetros intrínsecos.

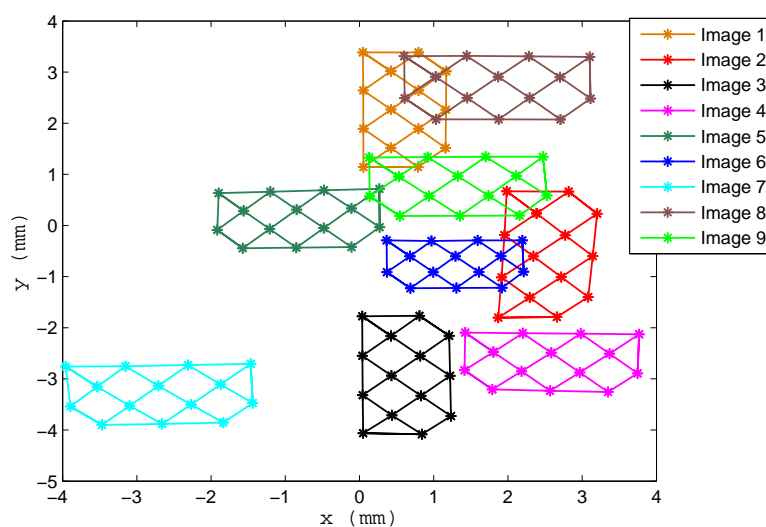


Figura 5.10: Set de imágenes para la lente JF7.5M-2

En este caso, se muestran los resultados de la calibración geométrica en función



del número de imágenes utilizadas, estas imágenes se obtuvieron con la calibración eléctrica realizada, ya que, como se mostró con la anterior lente el error es inasumible si no se realiza

Tabla 5.12: Resultados de la calibración de la lente JF7.5M-2 con diferente número de imágenes

Numero de imágenes	8	9	10	11	12
Residuals (mm)	$1.4599 \cdot 10^{-3}$	0.1227	$4.8331 \cdot 10^{-2}$	0.1899	0.2175
$C_x$ (mm)	-0.1471	-0.1999	-0.2211	-0.1703	-0.1799
$C_y$ (mm)	0.1586	0.1536	-0.0508	-0.1085	-0.1785
$f$ (mm)	8.1318	7.8380	7.0705	7.5267	7.4933
$\gamma$	$-5.4091 \cdot 10^{-3}$	$-3.6463 \cdot 10^{-3}$	$-8.2606 \cdot 10^{-3}$	$1.1067 \cdot 10^{-4}$	$1.3078 \cdot 10^{-4}$
$K_1$ /mm)	$-2.7808 \cdot 10^{-3}$	$-2.6163 \cdot 10^{-3}$	$-2.3022 \cdot 10^{-3}$	$-1.6412 \cdot 10^{-4}$	$-1.5478 \cdot 10^{-3}$
$K_2$ (mm)	$-1.0672 \cdot 10^{-4}$	$-1.1567 \cdot 10^{-4}$	$-1.6086 \cdot 10^{-4}$	$-2.1803 \cdot 10^{-4}$	$-2.2796 \cdot 10^{-4}$
$K_3$ (mm)	$1.3404 \cdot 10^{-6}$	$2.1313 \cdot 10^{-6}$	$4.2200 \cdot 10^{-6}$	$5.8473 \cdot 10^{-6}$	$6.3565 \cdot 10^{-6}$
$P_1$ (mm)	$1.4247 \cdot 10^{-4}$	$2.9718 \cdot 10^{-4}$	$2.3381 \cdot 10^{-4}$	$2.2626 \cdot 10^{-4}$	$2.2400 \cdot 10^{-4}$
$P_2$	$-4.4236 \cdot 10^{-4}$	$-1.1882 \cdot 10^{-4}$	$5.5282 \cdot 10^{-4}$	$3.9177 \cdot 10^{-4}$	$3.2860 \cdot 10^{-4}$
Iterations	58	35	30	22	23

Como era de suponer, los resultados se estabilizan cuando el número de imágenes es grande, como se comprueba comparando los resultados obtenidos con 11 y 12 imágenes, donde los cambios en los parámetros son pequeños. En este caso, en el que las distorsiones de la lente son mayores, son necesarios más puntos o más imágenes en comparación a lentes donde la distorsión es más pequeña.

Para mostrar la corrección de la distorsión se ha realizado una prueba que ha consistido en barrer toda la superficie del sensor PSD describiendo “una espiral” como se muestra en la figura 5.11, donde la línea azul presenta los puntos sin corregir, es decir los adquiridos, y la línea verde los puntos con la distorsión corregida.

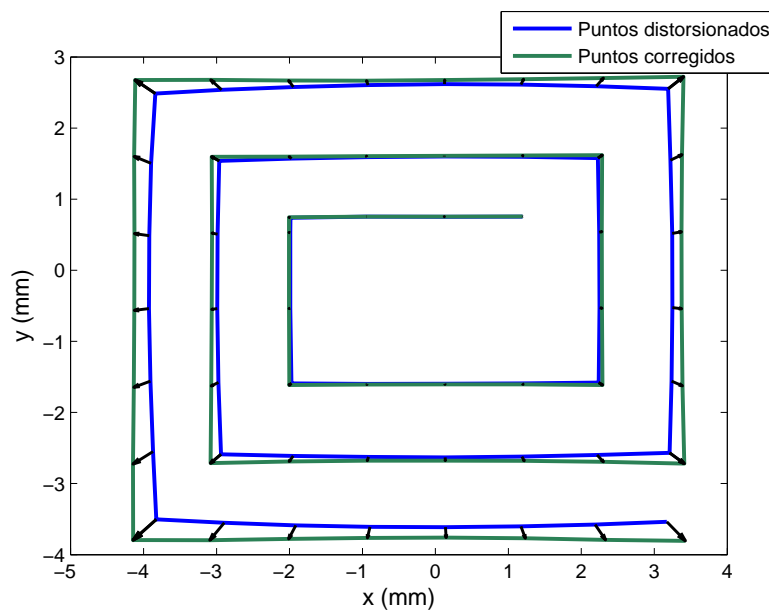


Figura 5.11: Corrección de la distorsión de la lente JF7.5M-2

Como en el caso anterior, vamos a calcular la distancia focal de acuerdo a la Ecuación 5.35, tomando las esquinas exteriores de la espiral (con la distorsión corregida) de la figura 5.10, siendo en este caso la distancia entre receptor y emisor de  $350 \pm 1$  mm, y las dimensiones del rectángulo que dibujan las 4 esquinas de 300x350 mm.

En el plano imagen las dimensiones del rectángulo son para la línea inferior de 7.5714 mm, el lado izquierdo de 6.4663 mm, el lado superior de 7.5130 mm y el lado derecho de 6.4797 mm, esto equivale a distancias focales de 7.5714 mm, 7.5441 mm, 7.5130 mm de 7.5597 mm respectivamente. Igual que en el anterior caso estos valores de distancia focal son cercanos a la distancia focal obtenida de la calibración, por lo tanto, se puede concluir que el proceso de calibración funciona correctamente.

## 5.5 Conclusiones

Las pruebas experimentales han demostrado que el modelo matemático propuesto para el sistema óptico (Sensor PSD más óptica) es válido al igual que el procedimiento para obtener sus parámetros. Los resultados obtenidos de las simulaciones y de las pruebas experimentales demuestran que el proceso de calibración propuesto funciona correctamente. Además, se propone una corrección preliminar de la corrección en caso de lentes con distorsiones elevadas ya que el método es sensible a la distorsión.

En cuanto a las fuentes de error analizadas, el ruido en los puntos que forman las imágenes no suelen ser un problema ya que para calibrar el sistema se puede disponer de un elevado SNR, la distorsión propia del sensor PSD en caso de ser tipo pin-cushion es una distorsión pequeña y, como se ha analizado, afecta muy poco al sistema y por último en cuanto a los desequilibrios en los factores de ganancias es necesario realizar la calibración eléctrica como la que se propone en el capítulo 4, ya que es el factor que más error produce en los valores de los parámetros intrínsecos.

También se ha demostrado con las últimas comprobaciones empíricas en las que se ha calculado la distancia focal, que los valores obtenidos de la calibración se corresponden con la realidad, así como también se ha comprobado que la distorsión de las lentes, ha sido corregida de forma satisfactoria.





## Capítulo 6

# Propuestas para la determinación de la posición 3D con PSDs.

En este capítulo se van a describir de forma detallada las diferentes propuestas para la determinación de la posición 3-D del agente móvil. Los métodos propuestos son los que se describen a continuación. El primero propone posicionar el agente móvil determinando el plano por el que se mueve e intersectando con él la recta que marca el AoA en el sensor PSD.

Otro método consiste en la determinación de la posición 3-D por medio de RSS y marcas, para lo cual se va a utilizar el AoA y RSS. En este caso es necesario conocer, en algún punto del entorno (marca) por el que vaya a pasar el agente, la posición 3-D con respecto al receptor; cuando el móvil pase por ese punto (o cercano) se determinará la potencia emitida y a partir de ese momento se podrá calcular la posición 3-D del agente móvil en cualquier punto del entorno visible para el receptor. Dado que la potencia puede variar por múltiples factores, cada vez que pase por una marca se recalculará la potencia emitida.

El siguiente método, determina la posición 3-D por medio de recepción estéreo en conjunto con RSS. Se propone determinar la posición del agente móvil por RSS como el caso anterior, pero para la estimación de la potencia emitida no es necesario conocer una posición previamente, sino que por medio de dos receptores ubicados estratégicamente en un lugar donde el paso de los agentes móviles sea frecuente, se obtendría la posición 3-D por medio de recepción estéreo, así como la potencia emitida y seguidamente se podrá obtener la posición aunque solo un receptor tuviese visión con el agente móvil.

Por último se propone un método (determinación de la posición 3-D por medio de RSS y PDoA), obteniendo la posición con un único receptor y sin conocer previamente la posición del agente móvil, pero utilizando la fase de la señal recibida en dos posiciones y calculando la diferencia de distancia entre las posiciones y el receptor. Este método requiere una gran estabilidad en la frecuencia de los osciladores utilizados.

## 6.1 Obtención de la posición 3-D con un solo PSD a partir del plano de movimiento del agente

Como se explicó en el capítulo 3 uno de los métodos más sencillos para determinar la posición 3-D, es obtener el plano por el que se mueve el agente móvil con respecto a la posición del sensor PSD, junto con el ángulo de incidencia de la señal al receptor.

Para calcular la ecuación de este plano se necesitan 3 puntos pertenecientes al mismo que no estén alineados, y conocer sus coordenadas respecto de la referencia del receptor. Dado que no se conocen las coordenadas respecto de dicha referencia va a ser necesario hacer uso de una plantilla de calibración de al menos 5 puntos (con posiciones relativas entre ellos conocidas), y se va a calcular la matriz de rotación y el vector de traslación de esa plantilla respecto al origen del receptor.

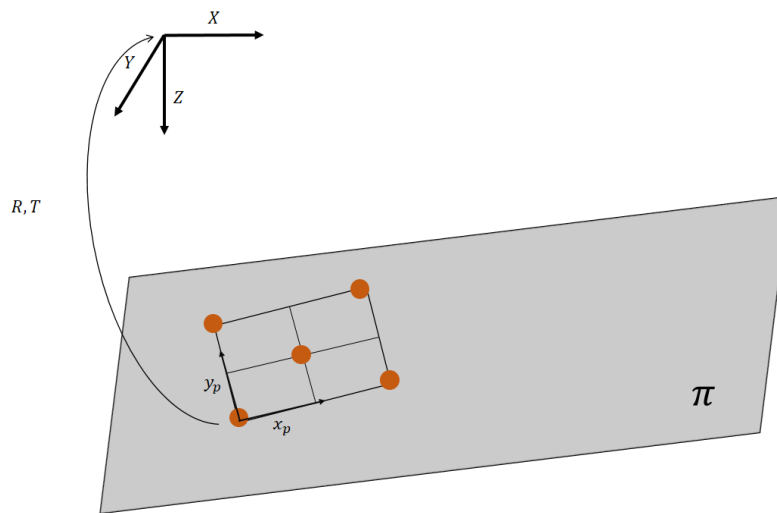


Figura 6.1: Determinación del plano  $\pi$  por medio de una plantilla de calibración de 5 puntos

donde  $(X, Y, Z)$  son las coordenadas del entorno con origen el receptor,  $(x_p, y_p)$  las coordenadas de la plantilla de calibración bidimensional,  $R, T$  la matriz y el vector de rotación y traslación respectivamente. Una vez adquiridos en el sensor PSD los puntos de impacto (imagen de los puntos de la plantilla) se les aplica la corrección de distorsión, y por medio de DLT se obtiene la matriz de proyección que relaciona el plano imagen con el entorno. Con esta información ya solo quedaría calcular la matriz de parámetros extrínsecos con las ecuaciones (5.28, 5.29, 5.30 y 5.31): Con los parámetros extrínsecos calculados, la posición 3D de los puntos con respecto al receptor se puede calcular a partir de (6.1).

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

Obtenidos los puntos 3D calculados de la plantilla, el cálculo de plano de interés se calcula de la forma descrita en el apartado 3.4.1, en el que solo se utilizarán 3 puntos de los 5 obtenidos de la plantilla de calibración. Obtenido el plano ya solo queda determinar  $(X, Y, Z)$ , calculando la intersección de la recta que determina el AoA con la ecuación del plano. Dado que lo que se obtiene de los puntos de impacto en el sensor PSD son los ángulos  $\alpha_x$  y  $\alpha_y$  (ángulos de incidencia respecto del eje  $x$  e  $y$  del receptor respectivamente), según (3.22), en lugar de utilizar la recta que une el agente con el receptor, se va a usar su descomposición en dos componentes. (6.2) representa la recta respecto al eje  $x$  y (6.3) la recta respecto del eje  $y$ .

$$X = Z \tan \alpha_x \quad (6.2)$$

$$Y = Z \tan \alpha_y \quad (6.3)$$

Sustituyendo  $(X, Y)$  de las ecuaciones (6.2) y (6.3), en la ecuación del plano (3.23), se obtiene (6.4).

$$A \tan \alpha_x Z + B \tan \alpha_y Z + CZ + D = 0 \quad (6.4)$$

Despejando  $Z$  se obtiene la profundidad entre el receptor y el agente móvil, y sustituyendo  $Z$  en (6.2) y (6.3) se obtienen  $X$  e  $Y$ . Este método presenta la desventaja de que únicamente se puede medir sobre planos calibrados y las ventajas de requiere únicamente de los ángulos de incidencia y la buena precisión en la determinación de la posición 3-D.

Los errores en el cálculo de las coordenadas 3-D de este método se reducen a dos, el primero la obtención del plano, y segundo al error que se cometerá debido a la obtención los ángulos de incidencia que provocarán errores en las coordenadas  $(X, Y, Z)$ .

Para evaluar el primero de los errores vamos a empezar por calcular el error que se cometería en la determinación de la profundidad ( $Z$ ) y posteriormente en las otras dos coordenadas  $(X, Y)$ ; siempre teniendo como referencia el origen de coordenadas del sensor PSD. En el caso de que el plano no estuviese bien calculado, y partiendo de (6.5), que es la ecuación para calcular la profundidad en la que se intersecta la recta con el plano,

$$Z = \frac{D}{A \tan \alpha_x + B \tan \alpha_y + C} \quad (6.5)$$

El error vendría dado por los errores en la determinación de los parámetros  $(A, B, C$  y  $D)$ , siendo el error total:

$$\Delta Z = \left| \frac{\partial Z}{\partial A} \right| \Delta A + \left| \frac{\partial Z}{\partial B} \right| \Delta B + \left| \frac{\partial Z}{\partial C} \right| \Delta C + \left| \frac{\partial Z}{\partial D} \right| \Delta D \quad (6.6)$$

donde:

$$\left| \frac{\partial Z}{\partial A} \right| = \frac{-D \tan \alpha_x}{(A \tan \alpha_x + B \tan \alpha_y + C)^2}$$

$$\left| \frac{\partial Z}{\partial B} \right| = \frac{-D \tan \alpha_y}{(A \tan \alpha_x + B \tan \alpha_y + C)^2}$$

$$\left| \frac{\partial Z}{\partial C} \right| = \frac{-D}{(A \tan \alpha_x + B \tan \alpha_y + C)^2}$$

$$\left| \frac{\partial Z}{\partial D} \right| = \frac{1}{A \tan \alpha_x + B \tan \alpha_y + C}$$

Para poder cuantificar el error en la determinación de la posición 3-D del agente móvil, se ha supuesto un ejemplo de un plano con inclinación respecto al plano del receptor y a una altura de 3 metros, (ya que, lo más probable sea que el plano y el receptor no sean coplanares en las diferentes aplicaciones):

$$A = 1205; B = -2174; C = -387855; D = 447135896$$

Debido a que  $C$  es mucho más grande que  $A$  y  $B$ , se puede aproximar las derivadas parciales a:

$$\left| \frac{\partial Z}{\partial A} \right| = \frac{-D \tan \alpha_x}{C^2}; \quad \left| \frac{\partial Z}{\partial B} \right| = \frac{-D \tan \alpha_y}{C^2}; \quad \left| \frac{\partial Z}{\partial C} \right| = \frac{-D}{C^2}; \quad \left| \frac{\partial Z}{\partial D} \right| = \frac{1}{C}$$

En la figura 6.2, se muestra cuantitativamente la sensibilidad en la determinación de la profundidad respecto a los parámetros que modelan el plano indicado anteriormente.

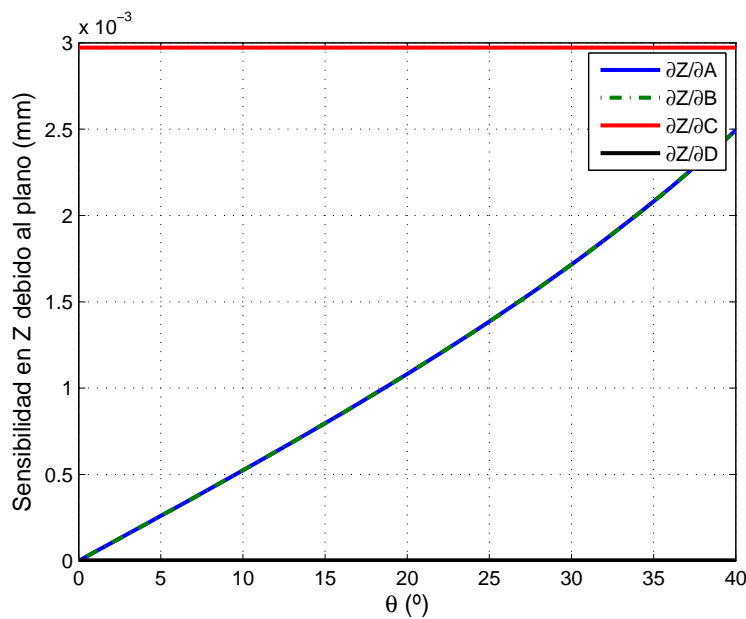


Figura 6.2: Sensibilidad en el cálculo de  $Z$  respecto a los parámetros que modelan el plano  $\pi$ .

Esta simulación es en caso particular del plano ejemplo, pero da una idea que si el plano no tiene mucha inclinación los parámetros  $A$  y  $B$  serán pequeños y por tanto el parámetro más sensible al error será  $C$ .

El error en  $Z$ , se traduce en un error en las coordenadas  $X$  e  $Y$ , siendo (6.7) y (6.8) la sensibilidad para ambas coordenadas.

$$\Delta X = \left| \frac{\partial X}{\partial Z} \right| \Delta Z = \tan \alpha_x \Delta Z \quad (6.7)$$

$$\Delta Y = \left| \frac{\partial Y}{\partial Z} \right| \Delta Z = \tan \alpha_y \Delta Z \quad (6.8)$$

En la figura 6.3 se muestra la sensibilidad en  $X$  a errores en  $Z$  de 1 mm y de 10 mm, en el caso de la coordenada  $Y$  el error sería el mismo.

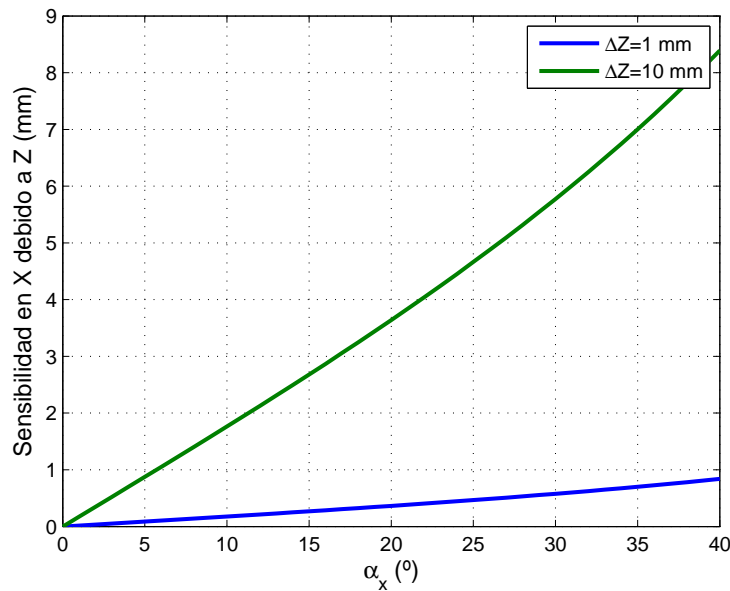


Figura 6.3: Sensibilidad en el cálculo de la coordenada  $X$  debido variaciones en la coordenada en la coordenada  $Z$ .

El otro error que se da en este método es debido a los errores en la determinación de los ángulos de incidencia, por lo que partiendo del supuesto que el plano calibrado es ideal, la sensibilidad en el cálculo de la profundidad (ecuación (6.5)) es:

$$\Delta Z = \left| \frac{\partial Z}{\partial \alpha_x} \right| \Delta \alpha_x + \left| \frac{\partial Z}{\partial \alpha_y} \right| \Delta \alpha_y \quad (6.9)$$

donde:

$$\frac{\partial Z}{\partial \alpha_x} = \frac{AD (\tan^2 \alpha_x + 1)}{(A \tan \alpha_x + B \tan \alpha_y + C)^2} \quad (6.10)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial \alpha_y} = \frac{BD (\tan^2 \alpha_y + 1)}{(A \tan \alpha_x + B \tan \alpha_y + C)^2} \quad (6.11)$$

Tomando como ejemplo el mismo plano que en el anterior caso, y por tanto siendo  $C$  mucho más grande que  $A$  y  $B$ ; las ecuaciones (6.10) y (6.11) se pueden aproximar a:

$$\frac{\partial Z}{\partial \alpha_x} = \frac{AD (\tan^2 \alpha_x + 1)}{C^2}$$

$$\frac{\partial Z}{\partial \alpha_y} = \frac{BD (\tan^2 \alpha_y + 1)}{C^2}$$

En la figura 6.4 se muestra la sensibilidad de  $Z$  con respecto a los ángulos de incidencia ( $\alpha_x$  y  $\alpha_y$ ) y el plano indicado.

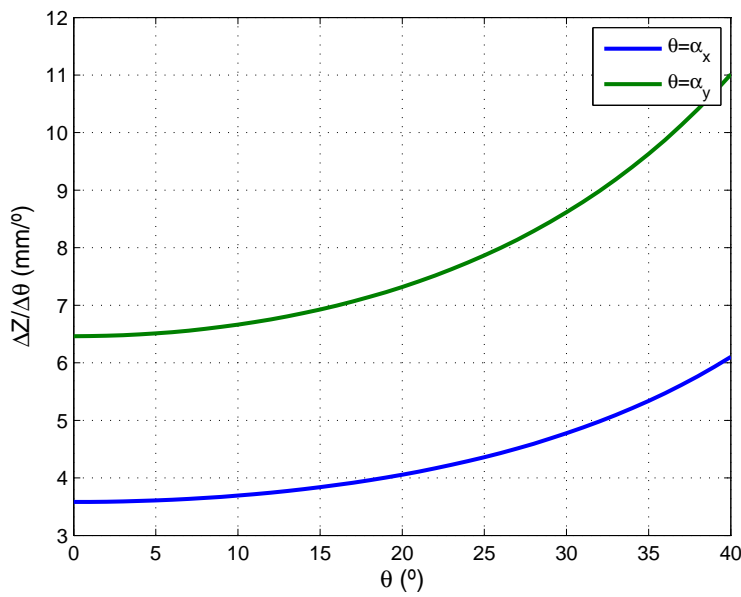


Figura 6.4: Sensibilidad de la coordenada  $Z$  respecto a los ángulos de incidencia.

Y seguidamente el error en  $X$  e  $Y$  (ecuaciones (6.2) y (6.3)), debido a los errores en los ángulos de incidencia y de  $Z$  son:

$$\Delta X = Z (\tan \alpha_x - \tan (\alpha_x + \Delta \alpha_x)) + \tan \alpha_x \Delta Z \quad (6.12)$$

$$\Delta Y = Z (\tan \alpha_y - \tan (\alpha_y + \Delta \alpha_y)) + \tan \alpha_y \Delta Z \quad (6.13)$$

Debido a que la sensibilidad en  $X$  e  $Y$  respecto al ángulo de incidencia de cada eje es igual, en la figura 6.5.a se muestra la sensibilidad únicamente para el eje  $X$  y a dos alturas diferentes y en figura 6.5.b se muestra la sensibilidad de  $X$  con respecto al error en  $Z$ .

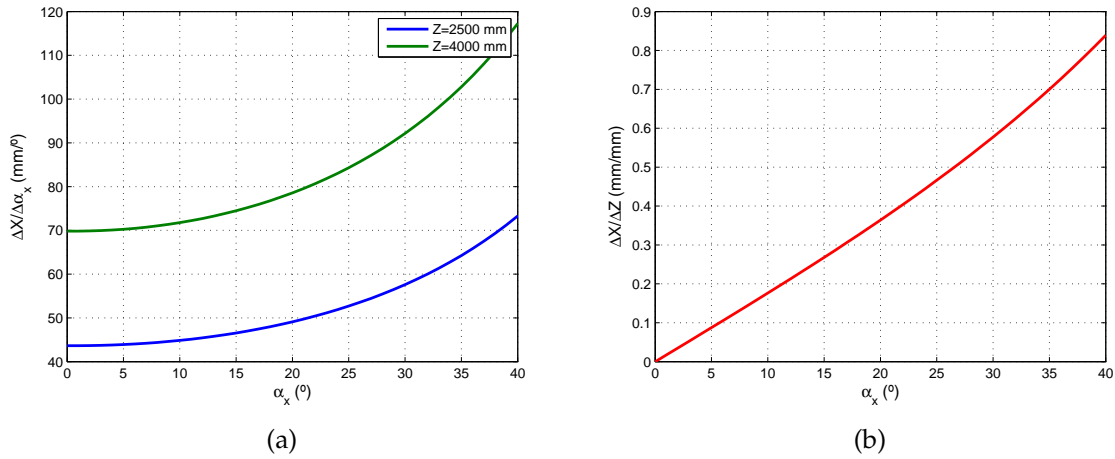


Figura 6.5: Sensibilidad en la coordenada X; (a) Respecto al ángulo de incidencia para Z igual a 2500 mm y 4000 mm; (b) Respecto al error en la coordenada Z.

Como los resultados indican, el mayor error podría provenir en el caso del cálculo de  $X$  e  $Y$ , ya que estos dependen fuertemente de los errores en el ángulo de incidencia, aunque como ya se ha comentado todos estos resultados dependerán de la orientación del receptor con el plano de movimiento del agente móvil.

Como conclusión se puede decir que este método es sencillo de llevar a cabo, el error en la determinación del plano influye poco y en el caso de los errores por la determinación del ángulo de incidencia afectarán en mayor medida a las coordenadas  $X$  e  $Y$ , siempre y cuando los vectores superficies del plano y el receptor sean parecidos, en caso contrario los parámetros  $A$  y  $B$  aumentarían haciendo que la sensibilidad en  $Z$  también aumente.

## 6.2 Determinación de la posición 3D por medio de RSS y marcas

Como se introdujo en el capítulo 3, para determinar la distancia entre receptor y emisor por medio de la potencia recibida es necesario conocer ciertos parámetros, como son los ángulos de incidencia y emisión, y la potencia emitida, como se muestra en (6.14).

$$P_R = \frac{A_R}{d^2} f(\theta) g(\phi) P_T \quad (6.14)$$

donde  $f(\theta)$  es la función que modela el comportamiento de la lente en función del ángulo de incidencia,  $g(\phi)$  la función que modela el patrón de emisión del LED en función del ángulo de emisión,  $P_T$  es la potencia de emisión,  $A_R$  el área del receptor, y  $d$  es la distancia.

La función que modela el patrón de emisión del LED viene dada por el fabricante, y se suele modelar según (6.15), donde  $n$  es el índice del modo del lóbulo del patrón de radiación, siendo  $n = \ln 0,5 / \ln(\cos(\phi_{1/2}))$ , y  $\phi_{1/2}$  es el ángulo mitad.



$$g(\phi) = \frac{n+1}{2\pi} \cos^n \phi \quad (6.15)$$

En un caso ejemplo como puede ser el LED SFH-4233 de osram, el ángulo mitad es de  $60^\circ$ , siendo  $n=1$  y por tanto la función queda del siguiente modo:

$$g(\phi) = \frac{1}{\pi} \cos \phi \quad (6.16)$$

En cuanto a la lente, si esta fuera delgada se podría asumir que  $f(\theta) = \cos(\theta)$ . Como esto no se va a poder asumir siempre, habrá que conocer su expresión o habrá que calcularla. Para mostrar cómo calcularla se propone un procedimiento en la cual se ha ubicado el emisor en una posición fija enfrenteado al receptor (que incorpora una lente gruesa esférica), y se ha ido girando el receptor sin variar el ángulo de su localización respecto al emisor ni la distancia, como se muestra en la figura 6.6, obteniendo de esta manera los ángulos y la potencia recibida.

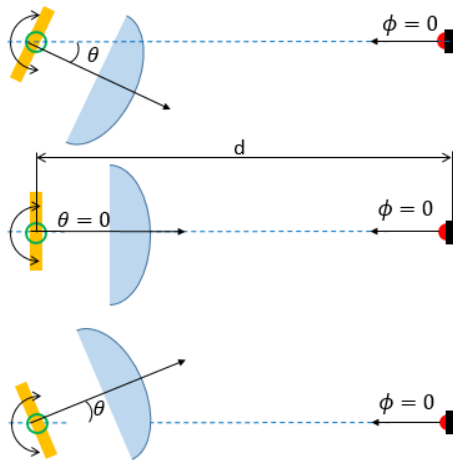


Figura 6.6: Esquema del movimiento del sensor para el modelado de la lente.

Una vez conocidos los modelos de,  $f(\theta)$  y  $g(\phi)$  el procedimiento para la determinación 3-D del agente móvil en el entorno es el siguiente:

1. Obtener la potencia de emisión (calibrar la potencia) a partir de la potencia recibida y de una posición 3-D conocida previamente (distancia, ángulos de emisión y recepción), haciendo uso de (6.17), donde el área de recepción  $A_R$  es una constante.

$$P_T = \frac{P_R d^2}{A_R f(\theta) g(\phi)} \quad (6.17)$$

2. Con la potencia emitida ya calculada se puede ir obteniendo la distancia del agente móvil, a partir de (6.8), para lo cual es necesario ir calculando la potencia recibida y los ángulos, suponiendo que la potencia emitida se mantiene constante (hay

que considerar que en condiciones normales la variación de potencia emitida, si se produce, lo hará en periodos muy largos y por tanto se podrá volver a calibrar antes de que la variación sea significativa).

$$d = \sqrt{\frac{A_R}{P_R} f(\theta) g(\phi) P_T} \quad (6.18)$$

3. Una vez calculada la distancia y conocidos los ángulos de incidencia  $(\alpha_x, \alpha_y, \theta)$  podemos calcular la posición 3-D del agente móvil con (6.19) para Z y (6.2) y (6.3) para obtener X e Y:

$$Z = d \cos \theta \quad (6.19)$$

En este caso el error en las coordenadas 3-D vendrá determinado por el error en el cálculo de la distancia y por los ángulos de incidencia (analizados en el apartado anterior); el error en la distancia es dependiente a su vez de los siguientes parámetros: ángulos de incidencia y emisión, y potencia emitida. A continuación, se describen los errores respecto de cada uno de estos parámetros:

- **Ángulo de incidencia ( $\theta$ ):** El error de  $\theta$ , es un error debido al error en el cálculo del punto de impacto sobre la superficie del sensor PSD, el error en el cálculo de la distancia focal (parámetros intrínsecos del modelo) y a la función que modela la lente.

$$\frac{\Delta d}{\Delta \theta} = \frac{A_R g(\phi) P_T}{2 P_R \sqrt{\frac{A_R}{P_R} f(\theta) g(\phi) P_T}} f'(\theta) \quad (6.20)$$

Sustituyendo (6.14) en (6.20), la sensibilidad de la determinación de la distancia respecto al ángulo de incidencia se puede expresar como:

$$\frac{\Delta d}{\Delta \theta} = \frac{f'(\theta)}{2 f(\theta)} d \quad (6.21)$$

Suponiendo que el modelo de la lente se ajusta a una función coseno, en la figura 6.7, se muestra la sensibilidad en el cálculo de la distancia con respecto a 0.1 y 0.5 grado de error en el ángulo de incidencia, a distancias de 2.5 y 4 metros.

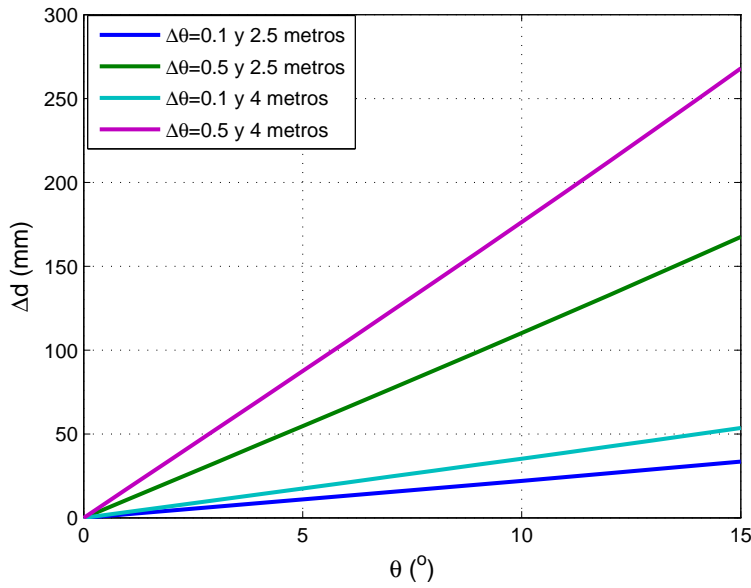


Figura 6.7: Sensibilidad de la distancia en función del ángulo de incidencia, para errores de 0.1 y 0.5 en el ángulo de incidencia, y distancias de 2.5 y 4 m.

- **Ángulo de emisión ( $\phi$ ):** El error de  $\phi$  viene determinado por el error cometido en la determinación del ángulo entre el vector superficie del detector (eje axial), y el vector superficie del emisor. En un caso de estudio ideal siempre se supone que son coplanares, algo que es muy improbable que suceda. En un caso general el error en la distancia debido al ángulo de emisión ( $\phi$ ) es:

$$d_{ideal} = \sqrt{\frac{A_R}{P_R} f(\theta) g(\phi) P_T} \quad (6.22)$$

Asumiendo que  $\theta$  no varía tenemos que:

$$d_{Real} = \sqrt{\frac{A_R}{P_R} f(\theta) g(\phi + \epsilon) P_T} \quad (6.23)$$

Y por lo tanto el error en distancia es:

$$\epsilon_d = \sqrt{\frac{A_R}{P_R} f(\theta) g(\phi + \epsilon) P_T} - \sqrt{\frac{A_R}{P_R} f(\theta) g(\phi) P_T} \quad (6.24)$$

Sustituyendo (6.14) en (6.24) queda:

$$\epsilon_d = d \left( \sqrt{\frac{g(\phi + \epsilon)}{g(\phi)}} - 1 \right) \quad (6.25)$$

En la figura 6.8 se muestra el error en la determinación de la distancia debido al error del ángulo de incidencia respecto al de emisión, para diferencias entre 1 y 5 grados a 4 metros.

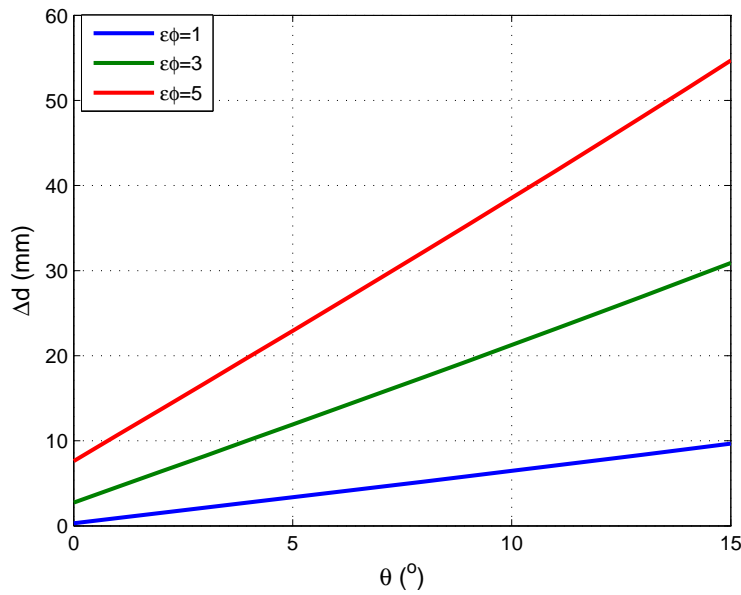


Figura 6.8: Error en el cálculo de la distancia debido al error de ángulo de emisión, para una profundidad de 4 metros.

Como consecuencia de estos resultados, se puede concluir que colocar el receptor cometiendo un pequeño desajuste, no conlleva errores inasumibles, siendo además estos resultados los obtenidos evaluando a 4 metros de distancia.

- **Potencia emitida ( $P_T$ ):** Por último evaluamos la variación respecto de la potencia emitida. El error debido a este parámetro viene dado por el hecho que calibramos dicha potencia en un instante de tiempo y la suponemos invariante, no siendo así, aunque la variación en tiempos cortos será pequeña. La sensibilidad del cálculo de la distancia queda determinada de acuerdo a 6.26.

$$\frac{\Delta d}{\Delta P_T} = \frac{A_R f(\theta) g(\phi)}{2P_R \sqrt{\frac{A_R}{P_R} f(\theta) g(\phi) P_T}} \quad (6.26)$$

Sustituyendo (6.14) en (6.26) queda:

$$\frac{\Delta d}{\Delta P_T} = \frac{d}{2P_T} \quad (6.27)$$

Igualmente que en los casos anteriores se ha cuantificado la sensibilidad. En la figura 6.9 se muestra la variación en el cálculo de la distancia a distancias de 2 y 4 metros y con diferencias en la variación de la potencia transmitida de 1 y 10 mW, para un rango de 300-500 mW, que es el rango de trabajo realista, por ejemplo para el emisor SFH-4233.

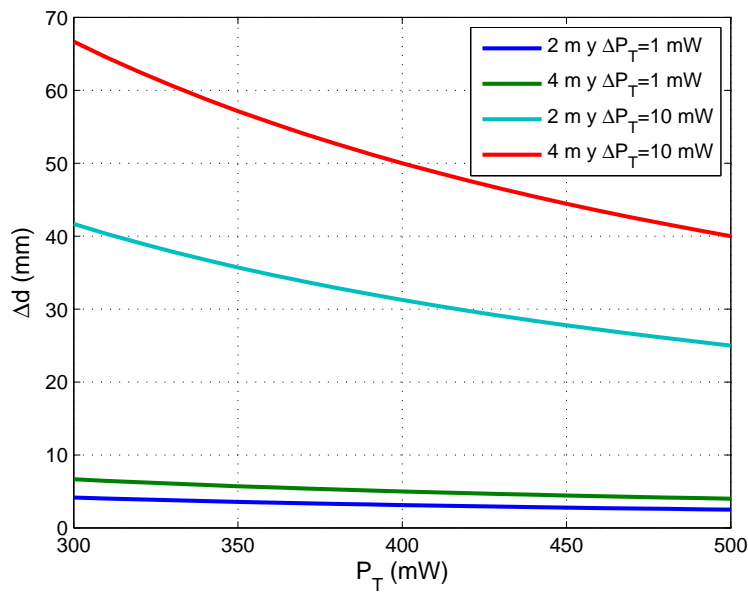


Figura 6.9: Sensibilidad en el cálculo de la distancia a 2 y 4 metros y variaciones de potencia de 1 y 10 mW.

Como conclusión a estos resultados se puede decir que en caso de que la variación de la potencia emitida sea pequeña 1 mW el error en el cálculo de la distancia es menor a un cm, sin embargo, en caso de que esta variación aumente habrá que tomarla en cuenta. Así, por ejemplo, si la diferencia de potencia emitida en función de la temperatura es de  $-0.3\%$  por cada grado kelvin, se tiene que ante una variación de  $5^\circ$  con 300 mW de potencia emitida nominal, la variación sería de  $-4.5$  mW y esto llevado al error en distancia supondría 3 cm en el caso que la distancia de 4 metros.

Del análisis realizado, se concluye que es un método muy sensible la potencia emitida y al ángulo de incidencia, con lo que es imprescindible, que la potencia emitida por el emisor sea estable, por ejemplo, utilizando reguladores de corriente y controlando la temperatura del emisor, y que la medición del ángulo de incidencia sea precisa, que dependerá de la calibración geométrica realizada.

### 6.3 Determinación de la posición 3D por medio de RSS y recepción estéreo

Como en el caso anterior se pretende determinar la posición 3-D por medio de la potencia recibida. Sin embargo, en este caso se va a hacer uso de la recepción estéreo para calibrar la potencia emitida. Siempre que el emisor pase por una zona donde se pueda determinar la posición 3-D mediante recepción estéreo (porque habrá colocados dos receptores) se calibrará la potencia emitida y cuando esté en una zona donde solo un receptor vea al emisor se determinará por potencia recibida.

Para poder determinar la posición 3-D por recepción estéreo, lo primero que se ha de hacer es calibrar el sistema, es decir, según la figura 6.10 obtener la relación entre los orígenes de coordenadas de referencia de los receptores  $P_L$  y  $P_R$  que vendrá dada por una matriz de rotación  $R_{LR}$  y un vector de traslación  $T_{LR}$ . Para ello se van a obtener las matrices de rotación y los vectores de traslación del par de receptores a una misma plantilla colocada en el entorno y a partir de esas relaciones se obtendrá la relación entre el par de cámaras. En la figura 6.10 se ilustra este proceso indicando las matrices y vectores correspondientes

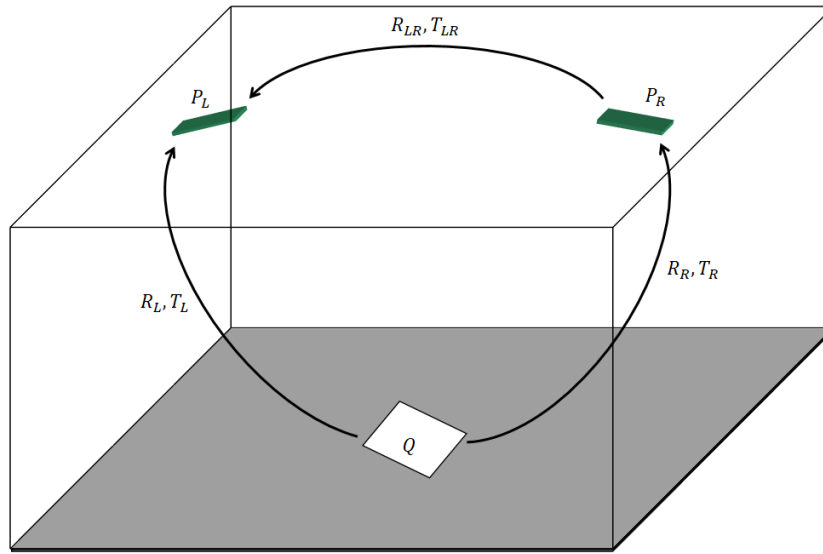


Figura 6.10: Esquema ilustrativo de la calibración estéreo

$Q$  representa a la plantilla que estará compuesta de varios puntos cuyas coordenadas tendrán su origen de referencia en la propia plantilla,  $P_R$  es el receptor “derecho”,  $P_L$  el receptor “izquierdo”,  $R_R, T_R$  la relación entre el receptor  $P_R$  y la plantilla de calibración y  $R_L, T_L$  la relación entre el receptor  $P_L$  y la plantilla de calibración.

Por lo tanto, siendo las relaciones de los receptores a la plantilla las siguientes:

$$P_L = R_L Q + T_L \quad (6.28)$$

$$P_R = R_R Q + T_R \quad (6.29)$$

despejando  $Q$  de (6.28) y sustituyendo en (6.29), se obtiene (6.30) que relaciona las posiciones de los receptores.

$$P_L = R_L \left( R_R^{-1} (P_R - T_R) \right) + T_L \quad (6.30)$$

Desarrollando esta expresión se obtiene:

$$P_L = R_L R_R^{-1} P_R - R_L R_R^{-1} T_R + T_L \quad (6.31)$$

Siendo, por tanto, la matriz de rotación y el vector de traslación entre los receptores los siguientes:

$$R_{LR} = R_L R_R^{-1} \quad (6.32)$$

$$T_{LR} = T_L - R_{LR} T_R \quad (6.33)$$

Una vez calculada la matriz de rotación  $R_{LR}$  y el vector de traslación  $T_{LR}$ , la posición 3-D del emisor IR se puede determinar con el cruce de las rectas que forman el origen de los receptores y la posición del emisor, como se muestra en la figura (6.11). Para el cálculo del cruce se hará uso de los ángulos de incidencia obtenidos respecto a los dos ejes de ambos receptores.

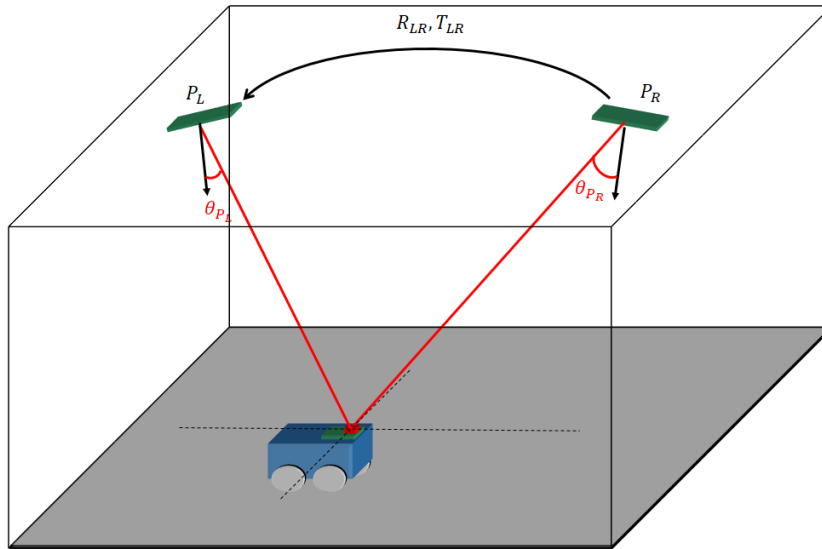


Figura 6.11: Cruce de las rectas para determinar las coordenadas 3-D

Por lo tanto, dada la recta que va desde el emisor al receptor  $P_L$ :

$$X_{P_L} = \tan \alpha_x^{P_L} Z_{P_L} \quad (6.34)$$

$$Y_{P_L} = \tan \alpha_y^{P_L} Z_{P_L} \quad (6.35)$$

$$Z_{P_L} = Z_{P_L} \quad (6.36)$$

donde  $X_{P_L}$ ,  $Y_{P_L}$  y  $Z_{P_L}$  son las coordenadas 3-D en el entorno tomando como referencia el receptor  $P_L$  y  $\alpha_x^{P_L}$  y  $\alpha_y^{P_L}$  los ángulos de incidencia para dicho receptor. y de igual forma la recta entre el emisor y el receptor  $P_R$ , según el origen del receptor  $P_R$ :

$$X_{P_R} = \tan \alpha_x^{P_R} Z_{P_R} \quad (6.37)$$

$$Y_{P_R} = \tan \alpha_y^{P_R} Z_{P_R} \quad (6.38)$$

$$Z_{P_R} = Z_{P_R} \quad (6.39)$$

donde  $X_{P_R}, Y_{P_R}$  y  $Z_{P_R}$  son las coordenadas 3-D en el entorno tomando como referencia el receptor  $P_R$ , y  $\alpha_x^{P_R}$  y  $\alpha_y^{P_R}$  los ángulos de incidencia. Trasladando el sistema de referencia de  $P_R$  al sistema de referencia del receptor  $P_L$ , utilizando la matriz de rotación ( $R_{LR}$  y el vector de traslación ( $T_{LR}$ ), obtenidos de la calibración estéreo, el sistema matemático queda del siguiente modo:

$$\begin{pmatrix} X_{P_L} \\ Y_{P_L} \\ Z_{P_L} \end{pmatrix} = R_{LR} \begin{pmatrix} X_{P_R} \\ Y_{P_R} \\ Z_{P_R} \end{pmatrix} + T_{LR} \quad (6.40)$$

y sustituyendo las ecuaciones de las rectas en (6.40), se obtiene la siguiente relación:

$$\begin{pmatrix} \tan \alpha_x^{P_L} Z_{P_L} \\ \tan \alpha_y^{P_L} Z_{P_L} \\ Z_{P_L} \end{pmatrix} = R_{LR} \begin{pmatrix} \tan \alpha_x^{P_R} Z_{P_R} \\ \tan \alpha_y^{P_R} Z_{P_R} \\ Z_{P_R} \end{pmatrix} + T_{LR} \quad (6.41)$$

Con lo cual, desarrollando queda el sistema matricial (6.42):

$$\begin{bmatrix} P_{P_L} & -R_{LR}P_{P_R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{P_L} \\ Z_{P_R} \end{bmatrix} = T_{LR} \quad (6.42)$$

donde:

$$P_{P_L} = \begin{pmatrix} \tan \alpha_x^{P_L} \\ \tan \alpha_y^{P_L} \\ 1 \end{pmatrix} \quad P_{P_R} = \begin{pmatrix} \tan \alpha_x^{P_R} \\ \tan \alpha_y^{P_R} \\ 1 \end{pmatrix}$$

Este sistema matricial se resuelve del modo siguiente:

$$x = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (6.43)$$

donde  $A$  es  $\begin{bmatrix} P_{P_L} & -R_{LR}P_{P_R} \end{bmatrix}$ ,  $b$  es  $T_{LR}$  y  $x^T$  las incógnitas a determinar  $\begin{bmatrix} Z_{P_L} & Z_{P_R} \end{bmatrix}$ .

Una vez calculada  $Z_{P_L}$ , se obtendrían con (6.34) y (6.35) las posiciones  $X_{P_L}$  y  $Y_{P_L}$ , obteniendo la posición 3-D del agente móvil y pudiendo conocer la potencia emitida en ese instante.

A partir de este momento se podría obtener la posición 3-D del emisor IR, por medio de la potencia recibida como se describe en el apartado 6.2.

El error en el posicionamiento utilizando recepción estéreo vendrá dado por el error



en los ángulos de incidencia en los dos receptores, y la posición entre ambos.

## 6.4 Determinación de la posición 3D por medio de RSS y PDoA

En este caso se pretende obtener la posición 3-D determinando la distancia entre receptor y emisor mediante diferencia de fase y de potencia recibida, como se explica en el apartado 3.4.4.

Este método se ha comenzado a investigar y a analizar sus dependencias y restricciones, pero dada su dificultad, se introducirá aquí siendo conscientes de que es una de las partes importantes a abordar con profundidad en trabajos futuros.

La propuesta se basa en calcular la fase de llegada y la potencia recibida de la señal emitida desde dos posiciones diferentes y obtener la diferencia de distancia y la distancia a esas posiciones. Por lo tanto, este sistema se basa en primera instancia en el cálculo de la diferencia de fases entre dos posiciones del agente y otra de diferencias de potencias recibidas en esas mismas dos posiciones. Ya que en los anteriores apartados ya se ha descrito el método de potencias recibidas, este apartado se va a centrar en la estimación de la fase y los problemas que conlleva.

Para el cálculo de fase se propone un demodulador I/Q, en el caso que las señales sean sinusoidales o un DLL en caso de que se utilicen secuencias.

### 6.4.1 Demodulador I/Q

En la figura 6.12 se muestra el diagrama del demodulador I/Q.

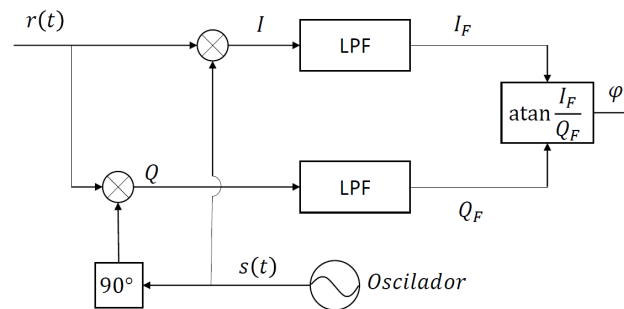


Figura 6.12: Diagrama de un demodulador I/Q

donde  $r(t)$  es la señal recibida,  $s(t)$  la señal sinusoidal de igual frecuencia a la señal recibida generada en el receptor,  $I$  la señal  $r(t) \cdot s(t)$ ,  $Q$  la señal  $r(t) \cdot s(t + 90^\circ)$ ,  $I_F$  la señal  $I$  filtrada,  $Q_F$  la señal  $Q$  filtrada y  $\varphi$  la fase de  $r(t)$ .

Con un funcionamiento ideal de este sistema en el cual la señal recibida está libre de ruido y las frecuencias del oscilador y el receptor son iguales, las ecuaciones del

receptor y el oscilador son las siguientes:

$$r(t) = A \sin (wt + \varphi) \quad (6.44)$$

$$s(t) = A \sin (wt) \quad (6.45)$$

donde  $A$  es la amplitud de la señal recibida,  $w$  es la frecuencia de las señales,  $t$  el tiempo y  $\varphi$  la fase de la señal recibida. El producto de la señal recibida, por la señal del oscilador y la señal del oscilador desfasada 90 grados, quedan del siguiente modo:

$$I(t) = r(t) \cdot s(t) = \frac{A}{2} (\cos \varphi + \cos (2wt + \varphi)) \quad (6.46)$$

$$Q(t) = r(t) \cdot s(t + 90^\circ) = -\frac{A}{2} (\sin \varphi + \sin (2wt + \varphi)) \quad (6.47)$$

El resultado del producto es un sumatorio de una señal con frecuencia nula y otra componente al doble de frecuencia de la de las señales; después del filtro paso bajo la componente  $2wt$  es eliminada, quedando las siguientes expresiones:

$$I_F(t) = \frac{A}{2} (\cos \varphi) \quad (6.48)$$

$$Q_F(t) = -\frac{A}{2} (\sin \varphi) \quad (6.49)$$

La fase se calcula:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{I_F(t)}{Q_F(t)} \quad (6.50)$$

Para mostrar un ejemplo en la figura 6.13.a, se representa un ejemplo de las señales  $I$ ,  $Q$ ,  $I_F$  y  $Q_F$ . En la figura 6.13.b, se muestra la FFT de la señal  $I$  donde se puede ver aparecen las dos componentes una a frecuencia 0 y otra al doble de frecuencia de la señal (160 kHz) y también se muestra la FFT de la señal filtrada, en la que solo aparece la componente de frecuencia 0.

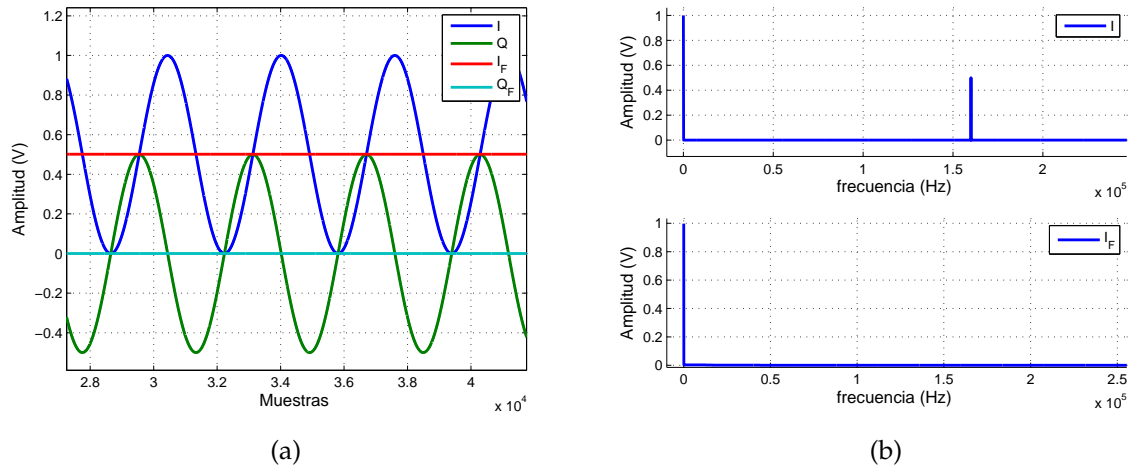


Figura 6.13: Demodulación I/Q: (a) Señales  $I$ ,  $Q$ ,  $I_F$  y  $Q_F$ ; (b) FFT de las señales  $I$  e  $I_F$

#### 6.4.2 Early-late Delay-Locked Loop

Otra propuesta para la medición de fase es utilizar un ELDLL, cuando en lugar de señales sinusoidales se utilizan secuencias como pueden ser: MLS (secuencias de máxima longitud), GOLD, KASAMI, etc.; la elección de las secuencias vendrá determinado por el número de agentes móviles y las características que se necesiten. Las secuencias MLS tienen muy buena autocorrelación, pero peor correlación cruzada que las GOLD o las KASAMI. Estas secuencias se van a modular, ya que el sensor PSD no puede seguir cambios bruscos de fase.

El tipo de modulación que se propone es BPSK debido a que es un tipo de modulación en la que todos los símbolos tienen la misma potencia, y eso provoca que tanto en emisión como en recepción los símbolos se ven afectados de igual manera. Además es una modulación eficiente frente a ruido en las señales. En la figura 6.14.a se muestra una secuencia MLS (color azul) y la misma secuencia modulada (color rojo) y en la figura 6.14.b, sus transformadas de Fourier.

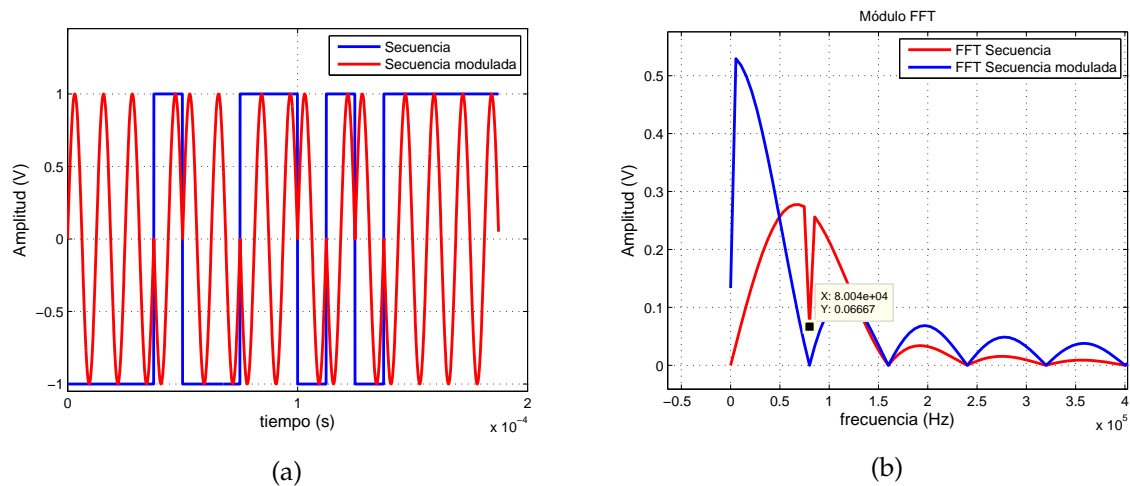


Figura 6.14: Representación del uso de secuencias moduladas; (a) Secuencia (azul) y secuencia modulada (rojo), siendo de igual frecuencia la señal portadora y la señal moduladora; (b) FFT de la secuencia y la señal modulada

En el ejemplo de la figura 6.15.a la frecuencia de la secuencia y la señal moduladora es la misma (80 kHz) y, como se puede observar en la figura 6.14.b, el ancho de banda del lóbulo principal es igual a la frecuencia de la secuencia (Azul) y una vez modulada, la señal se desplaza en frecuencia centrándose en la frecuencia de la moduladora, siendo en este caso el ancho de banda el doble de la frecuencia (Rojo).

En caso de necesitar o querer reducir interferencias a otras frecuencias, se puede variar las relaciones entre las frecuencias de la portadora y la moduladora. Así por ejemplo, en la figura 6.15.a se muestra un ejemplo de la secuencia MLS modulada a una frecuencia el doble que su frecuencia (frecuencia moduladora 160 kHz) y en la figura 6.15.b su transformada de Fourier.

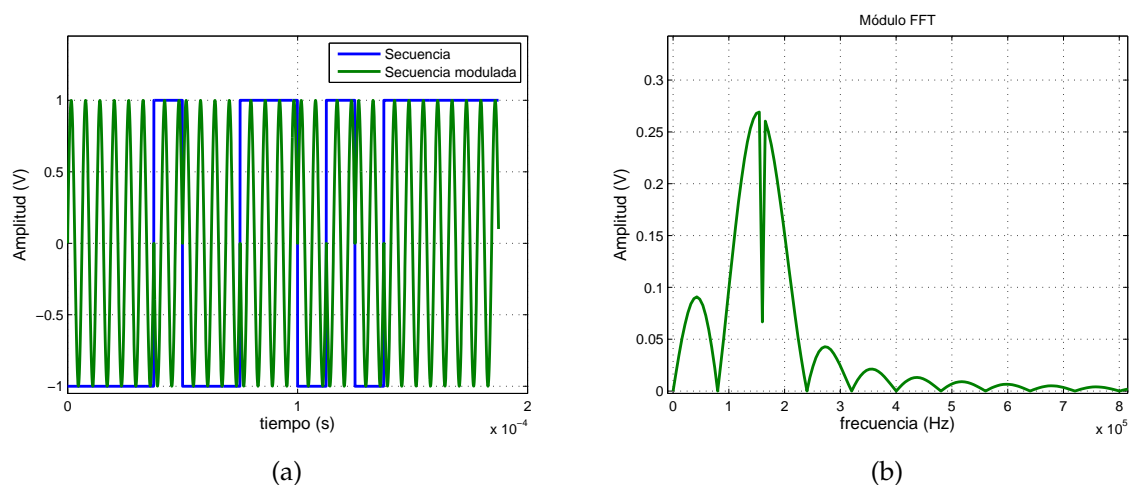


Figura 6.15: Uso de secuencias moduladas; (a) Secuencia (azul) y secuencia modulada (verde), siendo el doble la frecuencia de la señal moduladora que la portadora ; (b) FFT de la señal modulada

En la figura 6.16.b se puede apreciar claramente como el lóbulo principal se desplaza a la frecuencia de la señal moduladora, siendo el ancho de banda del lóbulo principal el doble de la frecuencia de la secuencia.

Como se ha comentado el cálculo de la fase de las señales se basa en un DLL Early-late, como el que se muestra en la figura 6.16. Este DLL se basa en realizar dos correlaciones, una con la secuencia desplazada  $\Delta T_{\text{chip}}$  y otra con  $-\Delta T_{\text{chip}}$ , restar las señales y buscar el cruce por cero que se producirá en el desfase entre la señal recibida y la señal generada.

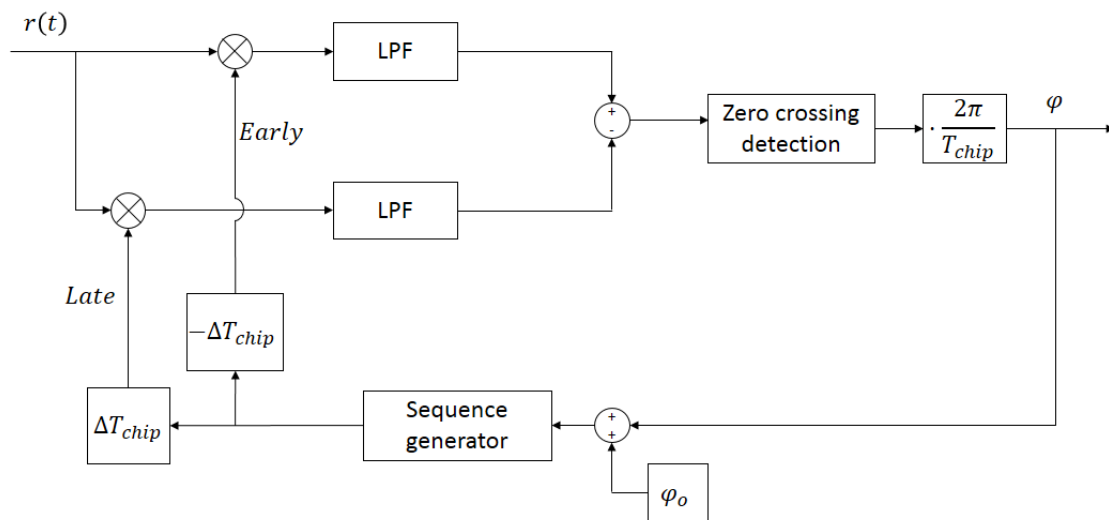


Figura 6.16: Diagrama de un Early-Late DLL

donde,  $\varphi_o$  es el desfase inicial y  $\varphi$  el desfase entre la señal del generador local y la señal recibida.

Para poder medir el desfase correctamente (o la diferencia de fases en dos instantes) la señal recibida y la señal del generador local deben estar sincronizados, es por ello que es necesario calcular  $\varphi_o$ . Este desfase inicial se obtiene tras realizar una secuencia de correlaciones variando el valor de hasta encontrar un máximo, en lo que denominamos “proceso de enganche” ( $\varphi_o$  será aquel en el que se alcance el pico de la correlación).

Una vez calculado  $\varphi_o$ , a la salida del ELDLL se tendrá la fase  $\varphi$ . En la figura 6.17 se muestra un ejemplo de las correlaciones de la señal recibida y las señales Early (Azul) y Late (Verde).

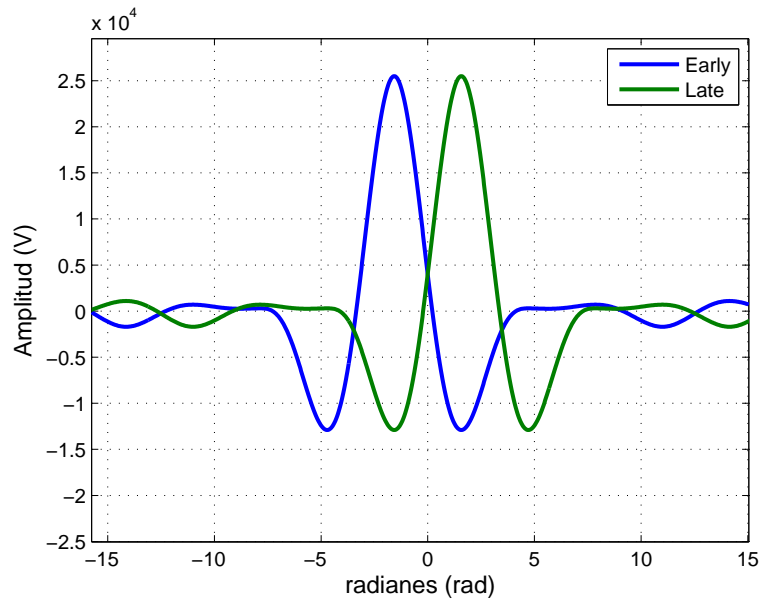


Figura 6.17: Correlación de la señal recibida con las réplicas Early y Late.

Realizando la resta de estas dos señales obtenemos la señal de la figura 6.18, siendo el centro el cruce por cero el valor del retardo, nótese que en este caso es un ejemplo ideal y por tanto la muestra coincide con el 0, sin embargo, debido al ruido y a la desincronización de la réplica y la señal recibida, el cálculo del cruce por cero habrá que determinarlo de alguna otra forma, por ejemplo utilizando puntos anteriores y posteriores al cruce por cero y obtener la ecuación de la recta de la cual se obtendría el cruce por cero.

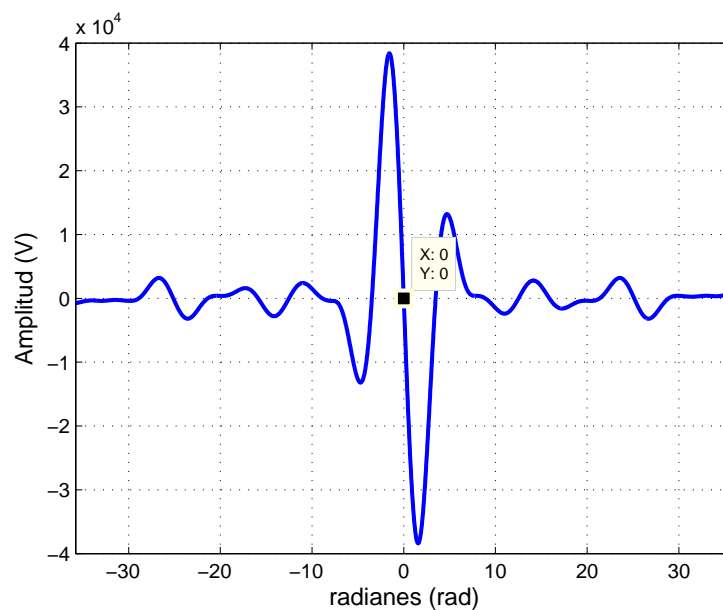


Figura 6.18: Resta de las correlaciones Early y Late

Por lo tanto, para calcular el desfase entre dos posiciones de agente, se medirá el

desplazamiento en el eje x del cruce por cero de la señal Early-Late en ambas posiciones. La figura 6.19 representa idealmente lo que ocurriría en el caso de que el agente móvil se desplazase y es que el cruce por cero de la señal se desplazaría, hacía adelante o atrás dependiendo de si se aleja o acerca.

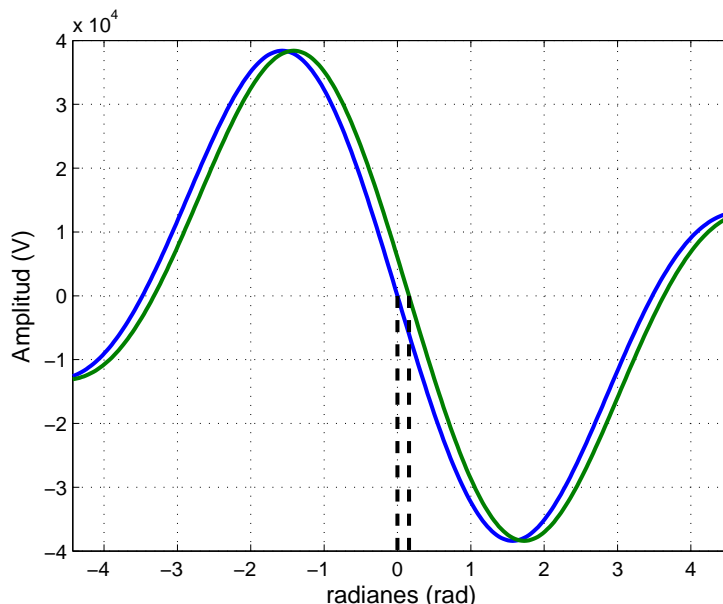


Figura 6.19: Representación de lo que ocurriría con la señal Early-Late para 2 posiciones diferentes del agente.

### 6.4.3 Efecto del ruido en las señales

Uno de los problemas en el cálculo de la fase es el ruido. Este afecta de tal forma que se producen desplazamientos de la señal Early-Late como se muestra en la figura 6.20. Este caso muestra una representación de una señal PSK de 255 símbolos a una frecuencia de 50 kHz y una frecuencia de muestreo de 5 MS/s, a las que se les ha añadido ruido correspondiente a un SNR de 10 dB.

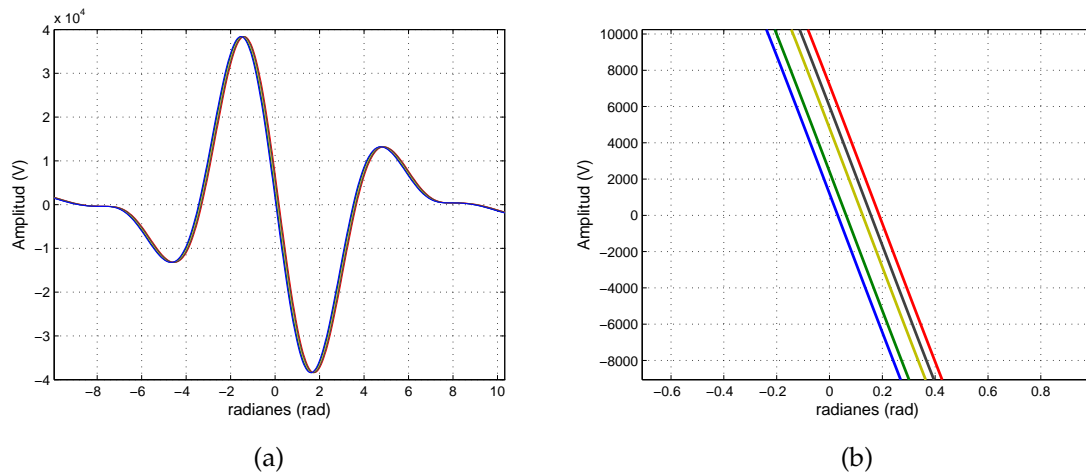


Figura 6.20: Discriminador DLL; (a) Early-Late con SNR en las señales de 10 dB; (b) Ampliación del cruce por cero

Como se muestra en la figura, el desplazamiento ha sido casi de 0.2 radianes esto equivale en distancia a 191 metros, cuando lo que se pretende precisiones de pocos cm. Para minimizar este efecto se pueden utilizar filtros, además de aumentar la frecuencia de muestreo o utilizar secuencias más largas. Este es un ejemplo únicamente para mostrar el efecto del ruido en las señales.

#### 6.4.4 Análisis de los osciladores

Tanto en el caso del demodulador IQ y el ELDLL, nos encontramos con un problema provocado por los osciladores. Fundamentalmente existen dos fuentes de error, la diferencia de frecuencias entre los relojes de emisores y receptores, y el jitter.

El problema de los osciladores viene dado por el hecho de que al trabajar con señales electromagnéticas que se propagan a  $3 \cdot 10^8$  m/s, y al necesitar medir diferencias de decenas de cm, pequeñas variaciones de picosegundos provocan errores de varios cm. Así, hay especificaciones que son importantes tener en cuenta del oscilador como son:

- **Estabilidad:** La estabilidad de un oscilador es la tendencia a la deriva en la frecuencia, por lo general la estabilidad suele ser un porcentaje de la frecuencia de oscilación y suelen darse en unidades de parte por millón. La estabilidad depende de varios parámetros como vibraciones, temperatura y tiempo. Por lo tanto, la frecuencia real del oscilador será:

$$f_{clk} = f_{clk_{nom}} \pm \Delta f_{clk} \quad (6.51)$$

Este problema se puede minimizar utilizando un PLL (Phase-locked loop), el cual tiene como función sincronizar las frecuencias entre la señal recibida y el oscilador.



- **Ruido de fase o jitter:** El ruido de fase se refiere al ruido en el dominio de la frecuencia, y suelen ser ruidos aleatorios muy cercanos a la frecuencia fundamental, siendo muy difícil su eliminación. Este factor de error suele ser del orden de nanosegundos, aunque se pueden encontrar osciladores en torno a los picosegundos. La frecuencia de oscilación queda del siguiente modo:

$$f_{clk} = f_{clk_{nom}} \pm \epsilon f_{clk} \quad (6.52)$$

En la figura 6.21 se muestra el error en el cálculo de las diferencias de distancias, teniendo en cuenta únicamente el jitter del oscilador del receptor.

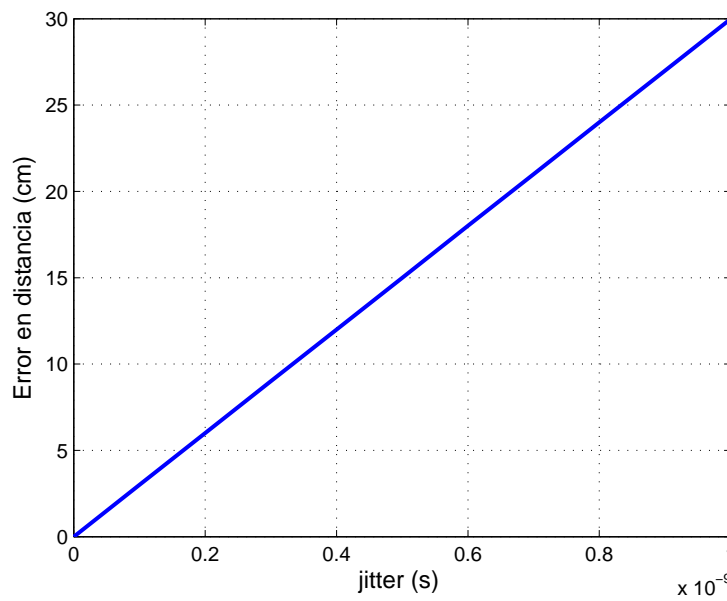


Figura 6.21: Error en el cálculo de la diferencia de distancia debido al jitter.

En el caso de tener también en cuenta el jitter del emisor el peor de los casos sería cuando el jitter es máximo y con signos opuestos ya que el error sería el doble. En el LPS presentado, donde las diferencias de distancias entre las posiciones están entorno a las decenas de cm, es el mayor problema que se presenta.

El jitter está caracterizado como un ruido blanco gaussiano, es decir, que su media cuando el tiempo tiende al infinito es cero, y por lo tanto en el caso de realizar medidas de fase, si se pudieran promediar el error debido a este efecto tendería a 0. En sistemas dinámicos en los cuales el agente móvil no está parado por mucho tiempo esto es inviable.

## 6.5 Conclusiones

En este capítulo se han propuesto y analizado varios métodos para la obtención de la posición 3-D, con la problemática, ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos, y analizando los errores derivados de cada tipo de posicionamiento.

En el caso de calibrar el plano de movimiento del agente el método es preciso, ya que únicamente con el ángulo de incidencia es posible posicionar el agente móvil con errores por debajo de pocos cm. Según el análisis realizado, el mayor error proviene del cálculo de los ángulos de incidencia, que en el caso de que sea 1° grado de error, a una altura de 2.5 metros se tendría entre 43 y 50 mm de error entre 0 y 20° grados, un error nada despreciable, pero en realidad un error de un grado cuando en un rango de comprendido entre los 0 y los 20 es un error grande. La desventaja de este método reside en el hecho de que solo se puede determinar la posición sobre el plano.

Los siguientes métodos analizados están basados en obtener la posición 3-D por medio de AoA y RSS. El primero de ellos presenta el handicap de que para obtener la calibración de la potencia de emisión se debe conocer la posición 3-D del agente móvil en algún punto de forma precisa y a priori, y además debido a las variaciones de la potencia de emisión debe pasar por esa zona cada cierto tiempo para recalibrarse, además en todos los casos que se utiliza RSS, asumimos que en el cálculo del ángulo entre los ejes axiales de emisor y receptor se van a cometer errores pequeños, ya que esto introduce también un error en la medida.

A parte de la problemática de necesitar un punto de referencia para calibrar la potencia emitida, este método es sensible a los errores en el cálculo del ángulo de incidencia, a la potencia emitida y a la diferencia entre el ángulo de incidencia y el ángulo emitido, que como ya se ha explicado se suponen iguales, al no tener ningún medio posible para su medición. En cuanto a la sensibilidad en el ángulo de incidencia este dependerá del modelo de la lente, en el caso analizado se ha modelado con una función coseno, la cual tiene una sensibilidad muy alta ante errores en el cálculo del ángulo de incidencia, siendo de decenas de cm en un FoV de 15 grados. En cuanto a los errores por la potencia emitida, se ha supuesto variaciones de 10 mW que son variaciones grandes, y los errores en el cálculo de la distancia están por debajo de los 7 cm a 4 metros de altura, y por último tenemos las diferencias entre el ángulo de incidencia y el de emisión, esté se ha supuesto una diferencia de 5° grados y el error en la medición de la distancia no supera los 6 cm en un FoV de 15° grados. Con lo que, todos estos factores presentan error altos, el que habrá que prestar más atención es al ángulo de incidencia y al modelado de la lente, ya que, podría presentar errores inasumibles.

A continuación se ha presentado un método que se basa en obtener la posición 3-D del agente móvil mediante recepción estéreo y a partir de esta calibrar la potencia emitida, en vez de utilizar una marca. Este par de receptores deben estar ubicados en un sitio de paso frecuente o forzar el paso de los agentes móviles por estas zonas para

así determinar (calibrar) la potencia de emisión. Los errores en la determinación de la posición 3-D, cuando se realiza estereografía, dependerá en gran medida del error en los ángulos de incidencia de ambos receptores y la ubicación entre ellos. Y en el caso de la determinación de la posición 3-D se realizará en un área donde solo un receptor tuviese cobertura los errores serían los mismos que en el anterior apartado.

Por último se ha descrito un método por el cual se puede determinar la posición 3-D del agente móvil, utilizando un único receptor y sin necesidad de conocer o calibrar nada, este método conlleva la problemática del cálculo del desfase entre dos puntos, ya que se pretende medir diferencias de pocas decenas de cm, que traducido a tiempo son diferencias menores al nanosegundo, esto hace que los osciladores deben tener un jitter por debajo de la centena de picosegundos para que el error sea pequeño. Este procedimiento que se ha indicado aquí necesita de una investigación más profunda que requerirá bastante tiempo, para poder determinar la viabilidad del mismo.

## Capítulo 7

# Pruebas experimentales y resultados

En este capítulo se van a describir las pruebas experimentales realizadas, así como los resultados obtenidos en las mismas. Se ha estructurado en varios apartados que se citan a continuación; en primer lugar, se describe la plataforma e instrumentación con la que se han realizado todas las pruebas, a continuación, se presentan las pruebas realizadas de discriminación multiagente, seguidas de los experimentos sobre las diversas estrategias de posicionamiento 3-D: calibración del plano por el que se mueven los agentes móviles, utilización de la potencia recibida y marcas, y determinación mediante de recepción estéreo. Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas en este capítulo.

### 7.1 Set-up para la realización de las pruebas

El conjunto de pruebas presentadas en este capítulo, se han realizado dentro de los laboratorios de investigación GEINTRA del Departamento de Electrónica de la Universidad de Alcalá. En la figura 7.1 se muestra el diagrama general del sistema.

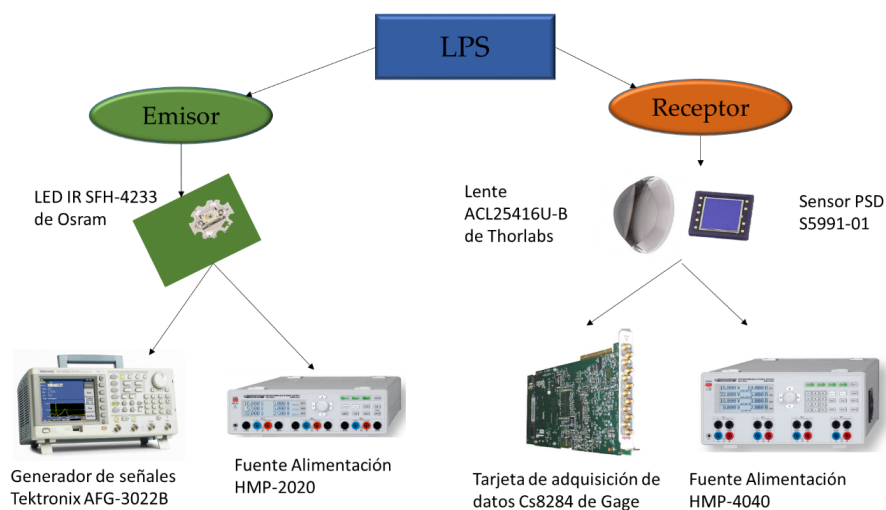


Figura 7.1: Diagrama del sistema

En la figura 7.2 se muestra el entorno de pruebas de laboratorio así como la ubicación del receptor y el plano por el que se va a mover el agente móvil. El receptor ha sido colocado de forma que ningún objeto esté dentro del FoV.



Figura 7.2: Escenario donde se han realizado las pruebas

La altura a la que se ha colocado el receptor sobre el suelo en las pruebas que aquí se muestran (plano de desplazamiento), ha sido de 2.52 metros aproximadamente. A esta distancia y con un ángulo de  $15^\circ$  de FoV, el área de visión en el suelo es de  $1300 \times 1300$  mm, considerando una colocación coplanar del receptor respecto al suelo.

Los componentes e instrumentación utilizados son los siguientes:

- Sensor PSD S5991-01, que tiene un área de  $9 \times 9$  mm, con el pico de máxima respuesta en una longitud de onda de 960 nm, y un tiempo de subida de  $2 \mu\text{s}$ . Acoplada al receptor se dispone una lente ACL25416U-B de focal  $16 \text{ mm} \pm 8\%$ , con un diámetro de 25.4 mm y con transmitancia acotada en un rango de longitudes de onda 650-1050 nm. La elección de este dispositivo, ha sido justificada ampliamente en capítulos anteriores. En la figura 7.3 se muestra el sensor, la lente, y la tarjeta desarrollada para el acondicionamiento y adquisición de señales del sensor PSD. Esta tarjeta ha sido diseñada a medida para poder realizar el control y captura de la información del receptor.

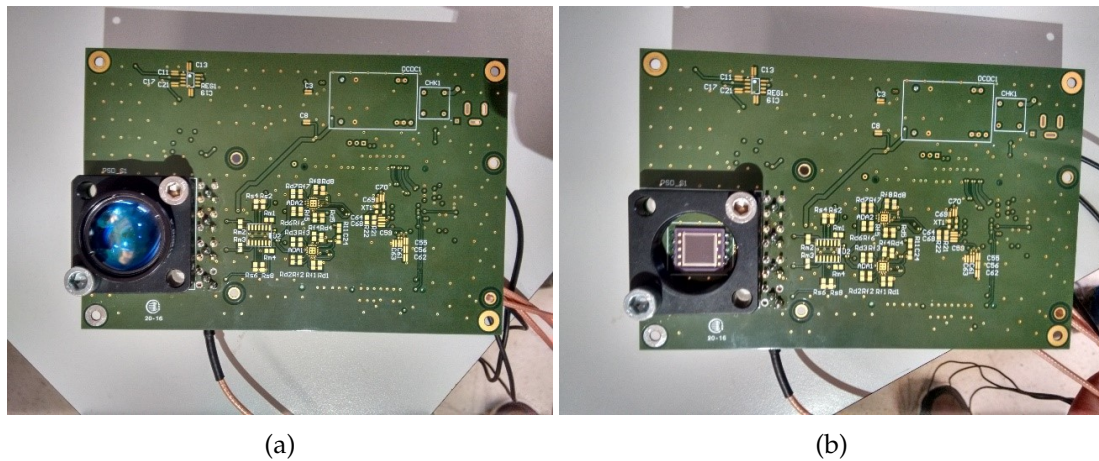


Figura 7.3: Placa de circuito impreso para sensor PSD; (a) PCB con lente; (b) PCB sin lente

- Emisor SFH-4233 de Osram, con longitud de onda de pico de 940 nm, 500 mW de intensidad radiante a 1 A, un patrón de emisión lambertiano y tiempos de subida y bajada de 8 y 14 ns. A este emisor se le pueden acoplar unas lentes que reducen el lóbulo del patrón de emisión; por ejemplo, la lente FL-42 LED-Lens, que reduce el ángulo mitad a  $10^\circ$  aumentando  $I_0$  en un factor 7.6 (en estas pruebas no se ha utilizado). En la figura 7.4 se muestra una imagen del emisor.

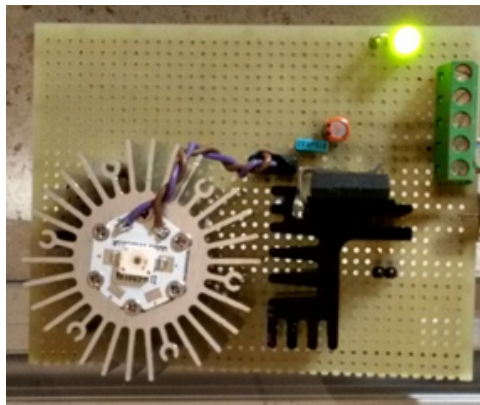


Figura 7.4: Emisor IR SFH-4233

- Tarjeta de adquisición de datos: el modelo escogido es el CS8284 de Gage (ver figura 7.5) tal y como se anticipó en el capítulo 4. Se trata fundamentalmente de una tarjeta con 8 canales de adquisición simultáneos a una frecuencia de muestreo máxima de 25 MS/s.



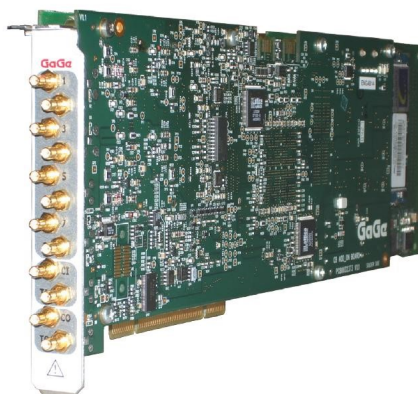


Figura 7.5: Tarjeta adquisición de datos CS8284 de Gage

- Fuentes de alimentación: HAMEG HMP-4040 para alimentar el receptor, y Hameg HMP-2020 para alimentar el emisor. La fuente HMP-4040 tiene 4 canales de salida de 0-32V, 0-10 A y 160 W máximos; en cuanto a la fuente HMP-2020 posee 2 salidas una de 0-32V, 0-10A y 160 W máximos y otra salida de 0-5.5V y 0-5A.
- Generador de funciones AFG 3022B de Tektronix para la generación de señales de emisión. Este generador tiene 2 salidas; la frecuencia, si la señal es sinusoidal, va desde 1  $\mu$ Hz hasta 240 MHz, tiene una resolución de 14 bits, tiempo de subida/bajada menor a 3 ns, jitter de 500 ps a 2GS/s y de 4 ns a 250 MS/s, rango de amplitudes entre 50 mVpp y 5 Vpp e impedancia de salida seleccionable de 1 $\Omega$  a 10k $\Omega$ , con 50 $\Omega$  por defecto. En la figura 7.6.a se muestra la fuente de alimentación y generador utilizados para el emisor, y en la figura 7.6.b se muestra el ordenador (con la tarjeta de adquisición integrada) y la fuente de alimentación utilizada para el receptor.

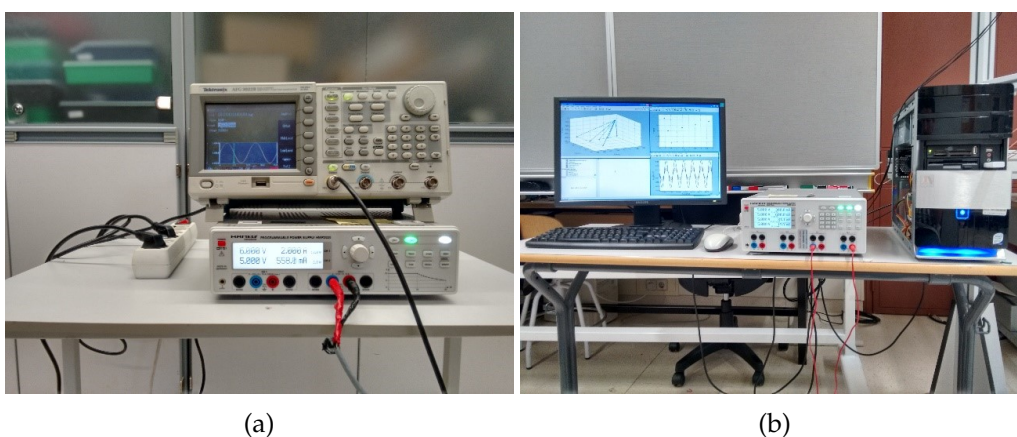


Figura 7.6: Instrumentación utilizada; (a) Fuente de alimentación HMP-2020 y genrador AFG 3252; (b) Ordenador con tarjeta de adquisición de datos CS8284 y fuente de alimentación HMP-4040.

Exceptuando el caso de la prueba de detección multiagente, en la que se han utilizado varias frecuencias de emisión, todas las demás pruebas se han realizado con

señales sinusoidales a 80 kHz, siendo este valor la mitad del ancho de banda del receptor, aproximadamente.

## 7.2 Detección e identificación de múltiples agentes

Esta prueba es interesante no solo por el hecho de que se demuestra que se pueden identificar y posicionar a la vez varios emisores con un único PSD, sino también por el hecho que para la calibración en las estrategias de desplazamiento en un plano o uso de recepción estéreo es necesario utilizar un patrón con al menos 5 puntos, y en el caso de poder construir un patrón con 5 emisores con diferentes frecuencias se puede hacer en un solo paso, sin necesidad de activar y desactivar consecutivamente los emisores. Es decir, posibilita que dichas calibraciones sean sencillas, rápidas y robustas.

Esta prueba ha consistido en posicionar 3 emisores en forma de triángulo rectángulo con 40 cm de longitud de los catetos, emitiendo cada emisor una frecuencia diferente. El objetivo es constatar que es un sistema sencillo que permite la detección de múltiples puntos simultáneamente y por ende el posicionamiento de varios agentes móviles. En este caso las frecuencias seleccionadas han sido 40 kHz, 60 kHz y 80 kHz. En la figura 7.7.a se muestran las señales de salida de los 4 electrodos del sensor PSD debida a la emisión de estos 3 emisores y en la figura 7.7.b, la FFT de la señal  $S_1$  (azul).

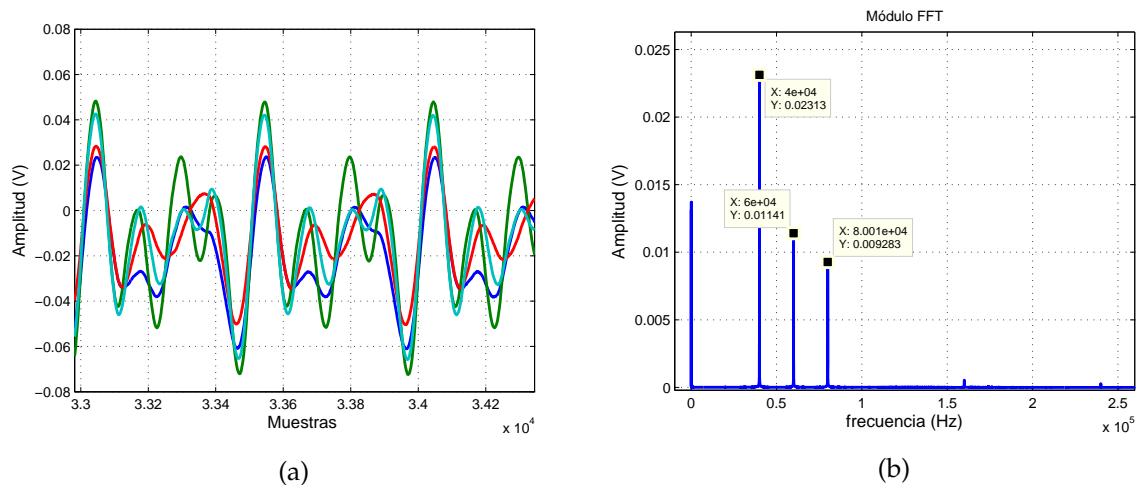


Figura 7.7: Prueba para la detección de múltiples agentes; (a) Señales de salida del sensor PSD emitiendo simultáneamente con tres emisores a diferentes frecuencias; (b) FFT de la señal  $S_1$

En la figura 7.7.a se puede observar que son señales que no tienen la frecuencia de un tono puro si no que son suma de varios tonos de diferente amplitud. De la figura 7.7.b se puede deducir que el SNR de las señales es grande, esto es debido a que las posiciones de los emisores estaban muy centrados en el FoV del sensor PSD y además las corrientes de polarización de los emisores son elevadas de 700 mA, teniendo su valor máximo en 1 A. Además, se puede observar una componente de la señal a baja frecuencia (100 Hz) que es debida a la iluminación del laboratorio.



Las señales de salida de los 4 electrodos del sensor PSD han sido filtradas con 3 filtros cada una, de tipo butterworth con 4kHz de ancho de banda centrados en 40 kHz, 60 kHz y 80 kHz. Como resultado se han obtenido señales como las mostradas en la figura 7.8.a, que se corresponden con las 3 componentes a esas frecuencias de la señal  $S_1$  de la figura 7.7.a. (electrodo 1). En la Figura 7.8.b se muestran los puntos de impacto sobre el plano imagen del sensor PSD, obtenidos tras filtrar las 4 salidas y calcular el correspondiente a cada frecuencia.

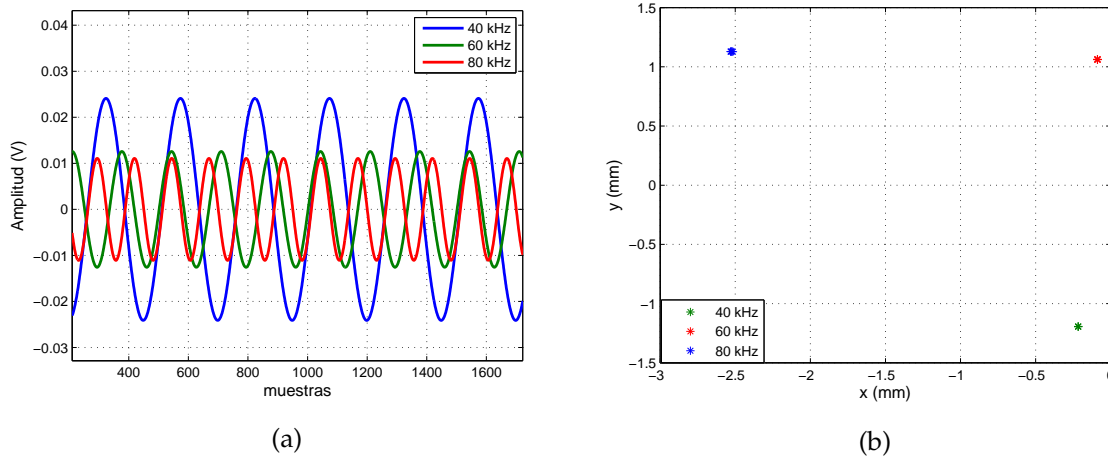


Figura 7.8: Prueba para la detección de múltiples agentes; (a) Señales filtradas de la salida del electrodo 1; (b) Punto de impacto sobre la superficie del sensor PSD de la señal de cada uno de los emisores

Para determinar la posición 3-D de esos puntos en el entorno por métodos geométricos, harían falta 4 emisores como mínimo, de forma que hay que aplicar alguna restricción en caso de querer determinar la posición de esos 3 puntos en el entorno. En este caso, vamos a suponer que el plano donde están ubicados los emisores y el receptor son coplanares, aunque en realidad no lo estén. Con lo que, en la figura 7.9 se muestran las posiciones 3-D obtenidas por medio de AoA y la ecuación (5.45).

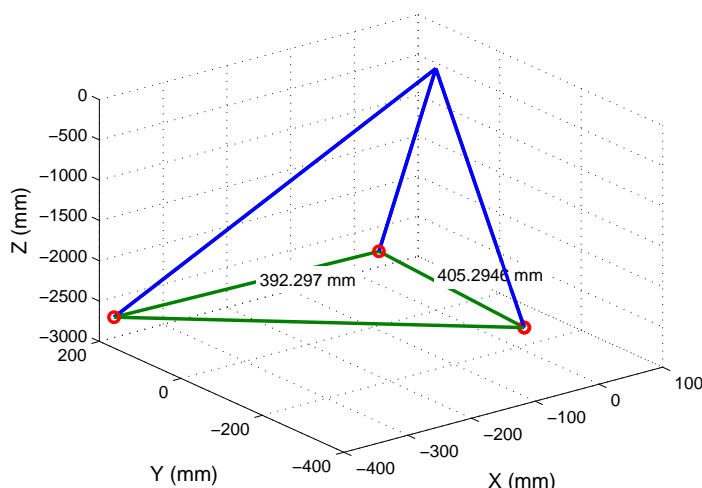


Figura 7.9: Puntos proyectados en el entorno suponiendo que el plano es coplanar al receptor

Las distancias entre los puntos, en el entorno son 392.297 mm y 405.2946, cuando deberían ser 400 mm en ambos casos, las diferencias entre estos valores reside en el supuesto de que el plano es coplanar al receptor, que en realidad no lo es.

Con esta prueba se ha demostrado que es factible detectar varios agentes simultáneamente con un procesado rápido y sencillo, obteniendo el punto de impacto de cada uno de estos, y por tanto aplicar sistemas de posicionamientos con varios agentes. El proceso también se podría haber invertido y colocar en el entorno emisores con diferente frecuencia (incluso en los sistemas de iluminación) y colocar el receptor en los agentes móviles; los resultados precisión y conclusiones serían idénticos

### 7.3 Posicionamiento 3-D a partir de la calibración del plano de movimiento

En este apartado se muestran los resultados obtenidos de posicionamiento 3-D con el sensor PSD, a partir de la determinación del plano por el que se mueve el agente móvil. La estrategia consiste en calibrar el plano de movimiento y, una vez conocido intersectar dicho plano con la recta marcada por AoA.

En la figura 7.10 se muestran los puntos captados en el plano imagen de una plantilla de calibración con 5 puntos luminosos que se ha colocado sobre el plano de movimiento para determinar la ecuación del mismo respecto de la referencia del receptor. Los 5 puntos incluidos son el mínimo necesario para obtener los tres ángulos de rotación y el vector de traslación entre la plantilla y el receptor, que es el primer paso para poder determinar la posición de esos puntos respecto a la posición y orientación del receptor.

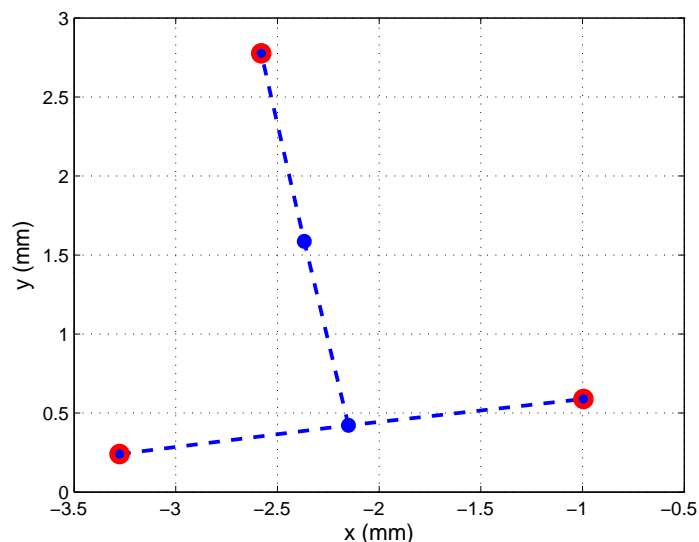


Figura 7.10: Puntos sobre el plano a calibrar captados en el plano imagen del sensor PSD.

En la figura 7.10, también se muestran en rojo los 3 puntos que se han utilizado tras el paso anterior para obtener la ecuación del plano. Tanto los cálculos de la matriz de rotación y vector de traslación, como de las coordenadas de los puntos se han realizado a partir de las ecuaciones (5.28, 5.29, 5.30 y 5.31) presentadas en el capítulo 5.

Las coordenadas calculadas para los 5 puntos en el entorno captados en esta prueba, respecto del origen de referencia del receptor son las mostradas en la tabla 7.1, mostrándose en la figura 7.11 un esquema de la proyección de los puntos en el entorno.

Tabla 7.1: Posiciones 3-D de la plantilla para calibración del plano

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
$X(mm)$	-529,03	-332,11	-135,19	-366,24	-400,36
$Y(mm)$	28,94	57,59	86,25	246,01	434,42
$Z(mm)$	-2582,24	-2602,35	-2622,45	-2544,59	-2486,83

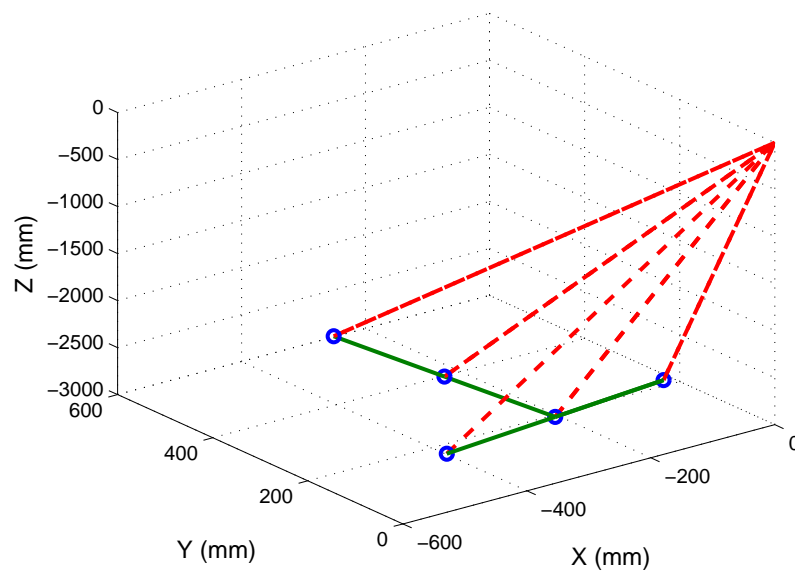


Figura 7.11: Puntos de la plantilla de calibración proyectados sobre el entorno a partir de sus imagen en el sensor PSD

Los parámetros del plano calculado, se muestran en la tabla 7.2, y en la figura 7.12 se muestra una ilustración del plano en el espacio de dimensiones con referencia (0,0,0) en el sensor PSD. La inclinación que se aprecia es debida a que el plano del sensor PSD no es coplanar con el plano por el que se desplazan los agentes móviles.

Tabla 7.2: Parámetros de la ecuación del plano

A	B	C	D
21771,29	-42750,003	-152314,903	-389930405,986

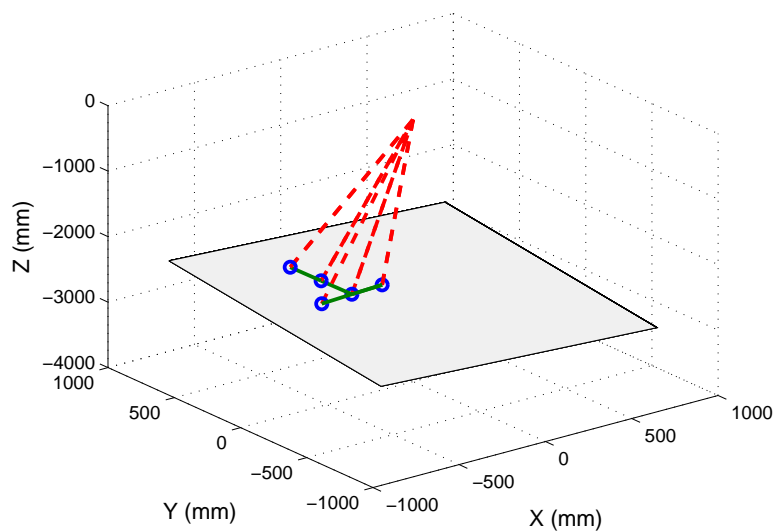


Figura 7.12: Ilustración de los puntos de la plantilla de la calibración sobre el plano calculado

Una vez calculada la ecuación del plano se han realizado varias pruebas; la primera de ellas, ya que se tienen las posiciones 3-D de los puntos de calibración, ha consistido en calcular por medio de AoA y el plano (intersección de la recta con el plano) esas mismas posiciones, determinando así el error que se podría esperar con esta técnica. La segunda prueba ha consistido en tomar varios puntos pertenecientes a una recta en dicho plano, elegidos en pasos equidistantes de 20 cm y en la tercera se ha tomado una circunferencia de 50 cm de radio.

Así, en la figura 7.13 se muestran en azul los puntos 3-D mostrados en la tabla 7.1 y en rojo los puntos obtenidos por medio de la intersección del plano y las rectas que forman los puntos con el receptor. En la tabla 7.3, se muestra el error de los puntos de la figura 7.13.

Tabla 7.3: Posiciones 3-D de la plantilla para calibración del plano

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
Error (mm)	0,3403	1,7459	0,5619	0,8522	0,7915
Error (%)	0,0129	0,0665	0,0214	0,033	0,031

Como se comprueba en la tabla 7.3 los errores en aquellos puntos que se ha utilizado para la obtención del plano (puntos 1, 3 y 5), presentan valores menores, pero insignificantes; el mayor error se da en el punto 2 el cual tiene un error de 1.7459 mm, de todas formas el error relativo cometido en la distancia es en el mayor de los casos 0.0665 % de la distancia entre el receptor y agente móvil.

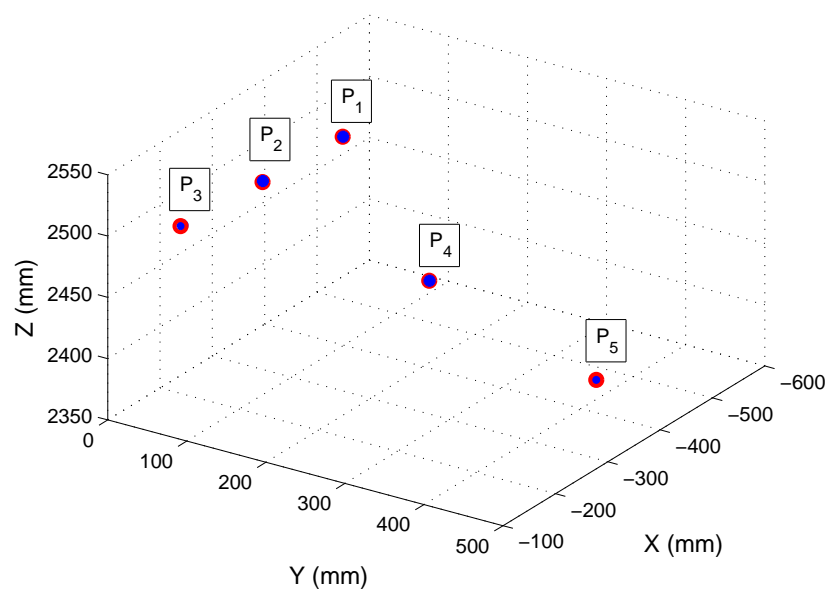


Figura 7.13: Comparativa de los puntos 3-D utilizados para la determinación del plano y los puntos calculados a partir de la intersección del plano y las rectas formadas por los ángulos de incidencia

En la figura 7.14 se muestra los puntos obtenidos directamente en el plano imagen del sensor PSD sin aplicar las correcciones de distorsión (azul) y también los puntos que hubieran correspondido con la distorsión corregida (verde). Se puede comprobar que la recta cruza casi toda el área activa en el eje  $x$  del sensor (eje  $x$  del FoV), con lo que la prueba abarca todo el rango de ángulos de incidencia. Hay que hacer constar que aunque el área activa del sensor PSD va desde -4.5 hasta 4.5 mm, los bordes de esa área se suelen evitar porque el error es mayor debido a que en los extremos no se garantiza que el haz impacte totalmente en el interior del sensor PSD.

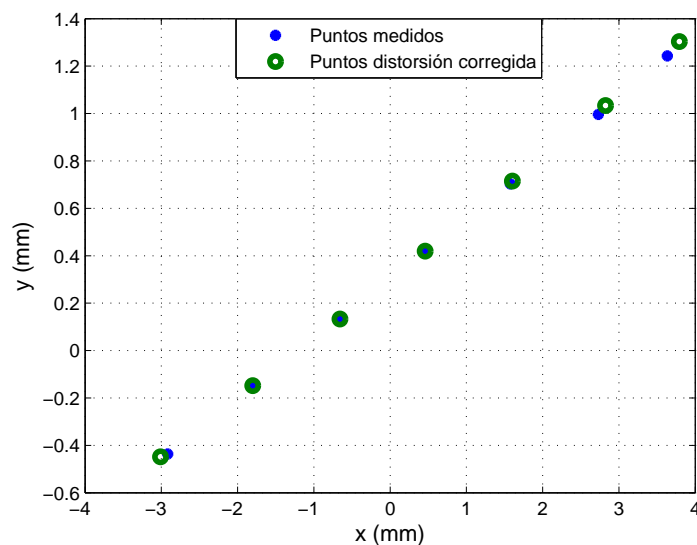


Figura 7.14: Puntos en el plano imagen obtenidos de los puntos de una recta en el entorno.

Si estos puntos los proyectásemos ahora sobre el entorno (sobre el plano) a partir de la recta que obtenemos del AoA, para calcular las coordenadas 3-D de los mismos (corte recta-plano) obtendríamos los que se muestran en la figura 7.15 y se detallan en la tabla 7.4 y en la tabla 7.5. En la Tabla 7.4 se muestran las distancias entre los puntos colindantes, así como sus errores absolutos y relativos a dicha distancia y en la tabla 7.5 las distancias con respecto al punto 3 e igualmente los errores.

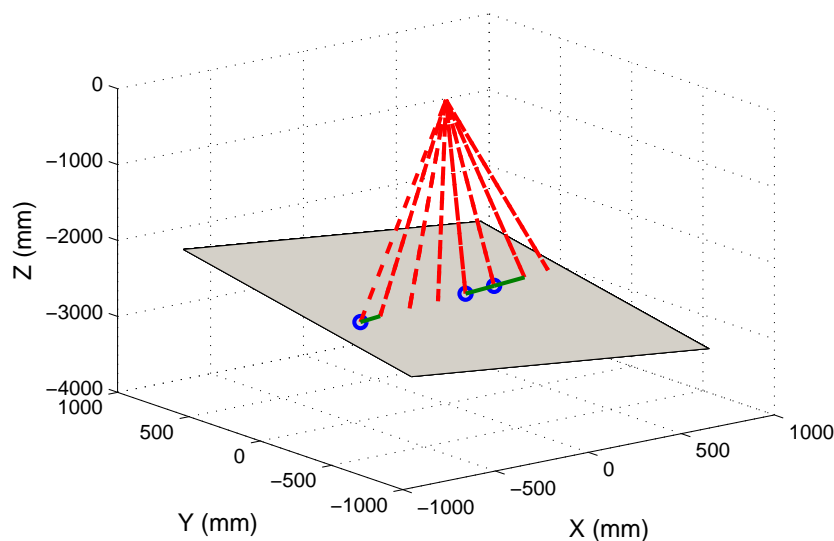


Figura 7.15: Puntos proyectados sobre el entorno y cortes con el plano que proporcionan las coordenadas 3-D

Tabla 7.4: Distancia calculada entre puntos proyectados sobre el plano

	P1-P2	P2-P3	P3-P4	P4-P5	P5-P6	P6-P7
Distancia entre los puntos (mm)	199,85	191,04	188,53	195,25	211,13	199,43
Error (mm)	0,149	8,955	11,463	4,748	-11,133	0,568
Error (%)	0,074	4,687	6,08	2,432	5,273	0,2848

De los resultados de la tabla 7.4 se puede concluir que los errores debido a este método son reducidos, siendo el mayor entre dos puntos consecutivos de 11.463 mm que corresponde a un 6.080 % del movimiento, Ya que, el movimiento y posicionamiento del emisor se realizó de forma manual habría que tener también en cuenta que parte de este error pudiera ser debido a dicho posicionamiento.

Tabla 7.5: Distancia calculada entre el punto 3 y los demás puntos

	P3-P1	P3-P2	P3-P4	P3-P5	P3-P6	P3-P7
Distancia entre P3 y los demás (mm)	-390,89	-191,04	188,53	383,78	594,91	794,34
Error (mm)	9,11	8,955	11,463	16,22	5,09	5,66
Error (%)	2,331	4,687	6,082	4,226	0,856	0,712

De aquí puede deducirse que los errores en distancia entre los puntos no son acumulativos, y que incluso hay más error entre el punto 3 y el 5 que entre el punto 3 y el 6, además cuanto mayor es la distancia el error relativo disminuye, esto es debido a lo comentado anteriormente que el error no es acumulativo.

La otra prueba de este apartado ha consistido en colocar el emisor en varias posiciones de una circunferencia de medio metro de radio; para ello se ha fijado al suelo un extremo de una estructura rígida de 50cm y al otro extremo se ha colocado el emisor. A continuación, se han tomado varios puntos estáticos. En la figura 7.16 se muestra los puntos en el plano imagen de la circunferencia trazada, donde puede observarse que parte de la misma sale del FoV.

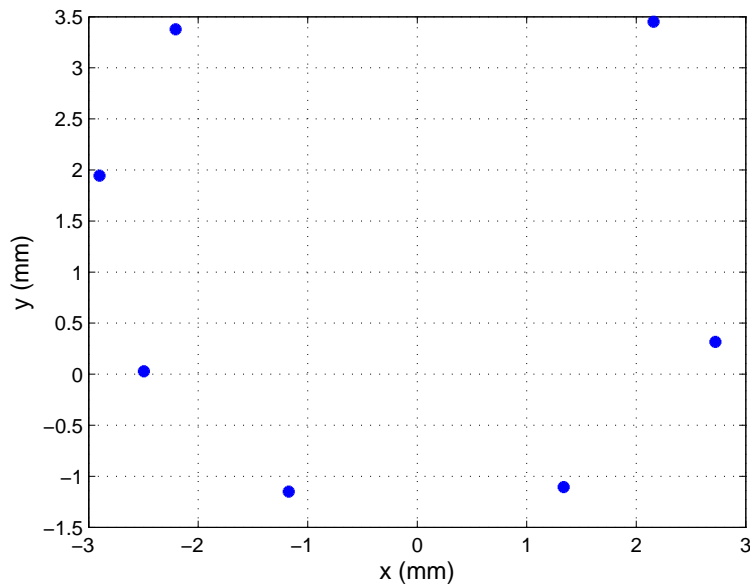


Figura 7.16: Puntos en el plano imagen de emisiones desde varios puntos de una circunferencia

Una vez corregidos los efectos no lineales, con las propuestas presentadas en esta tesis se ha procedido a la proyección de estos puntos sobre el entorno, como se muestra en la figura 7.17. En este caso al estar el plano inclinado con respecto al sensor PSD la figura obtenida en el plano imagen del sensor PSD es elíptica, por lo que si se desea calcular la circunferencia y su radio lo primero que se ha de hacer es corregir la inclinación de la elipse (o cambiar el origen de referencia al del plano).



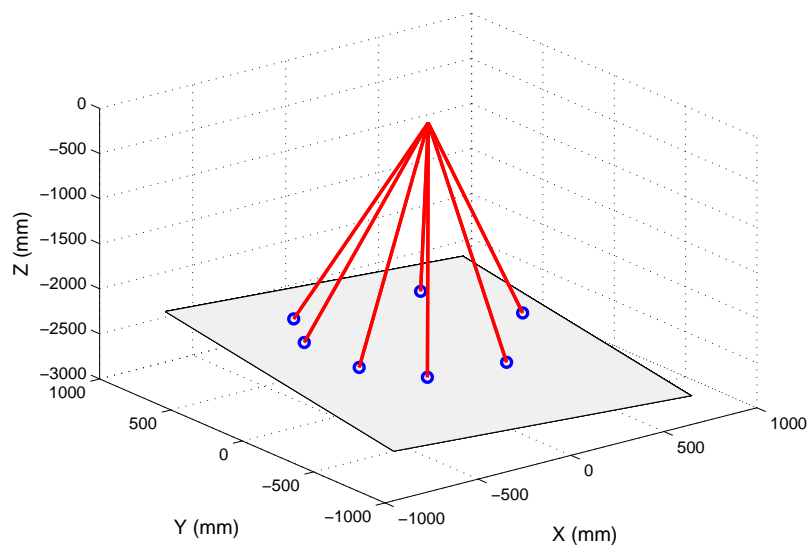


Figura 7.17: Proyección sobre el entorno de los puntas captados desde diferentes posiciones de la circunferencia.

A continuación se ha procedido a obtener mediante métodos iterativos la circunferencia que mejor se ajusta a los puntos proyectados. En la figura 7.18, puede verse el resultado en una vista sobre el plano. El radio obtenido de esta prueba ha sido de 496.644 mm, cercano al radio real de la circunferencia, oscilando el error cuadrático medio de la distancia de los puntos a la circunferencia desde 2.2089 mm el menor a 3.4272 mm el mayor.

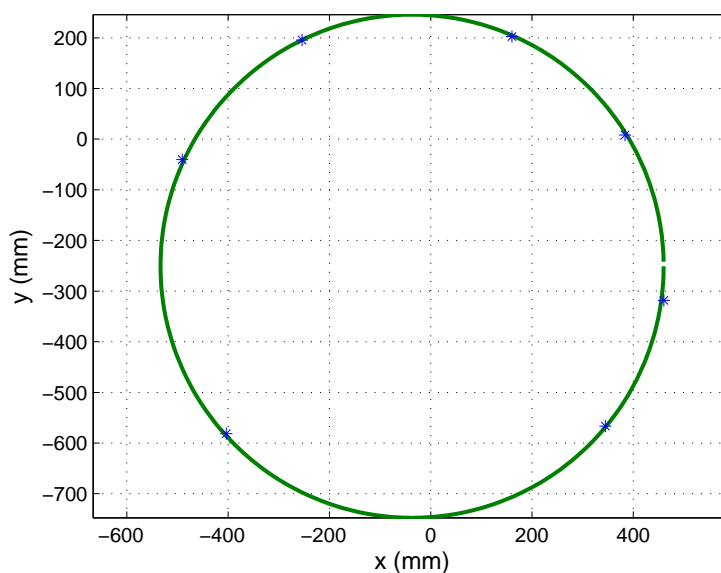


Figura 7.18: Cicunferencia obtenida sobre el plano a partir de los AoA calculados.

De las dos pruebas realizadas, se puede concluir, que esta es una alternativa mediante la que, si en el área del FoV se puede aproximar la superficie de desplazamiento

por un plano, el posicionamiento es muy preciso, cometiendo errores siempre inferiores a 1 cm, para las condiciones de medida de esta prueba. Si la altura del receptor aumentase, sin cambiar de lente, los errores crecerían linealmente, con la altura, con lo que seguiríamos hablando de errores muy pequeños. De igual manera el área vista por el sensor también sería mayor.

## 7.4 Posicionamiento 3-D a partir de RSS y marcas

Para comprobar el funcionamiento de este método, se ha realizado una prueba en la que se han utilizado 7 puntos de una recta en pasos de 20 cm sobre el plano calibrado (Azul) de la prueba anterior. Además, se han tomado otros 7 puntos (formado otra recta) desplazados 4.5 cm en altura y 4.5 cm lateralmente (Verde), respecto de los primeros, como se muestra en la figura 7.19.

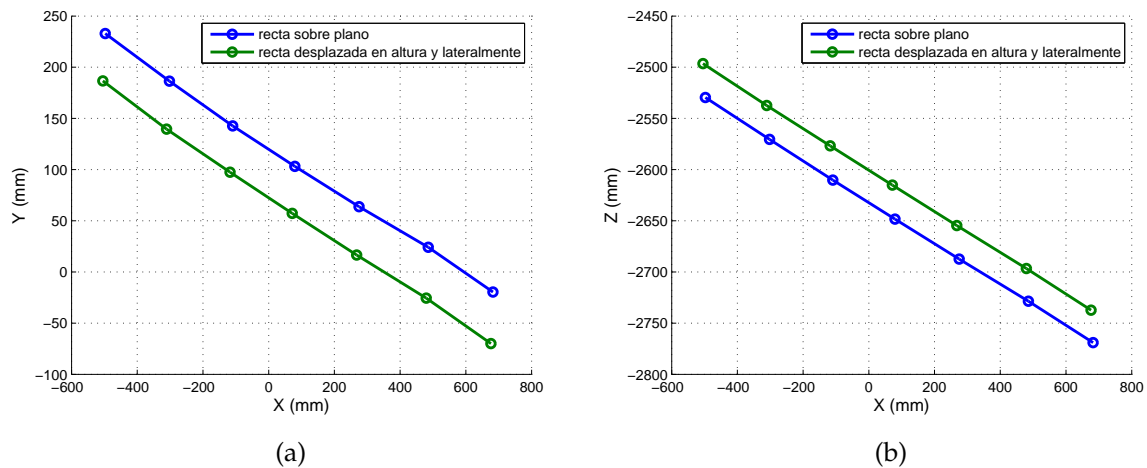


Figura 7.19: Puntos medidos de una recta en el plano; (a) Vista X-Y; (b) Vista X-Z.

Conocida la ecuación del plano se debe calcular la potencia emitida utilizando uno de los puntos tomados sobre el plano calibrado, mediante los métodos propuestos en el capítulo 6. Dado que para este paso es necesario conocer el comportamiento de la lente (que no podemos considerarla plana) se ha realizado una prueba que se expone a continuación.

El modelo de la lente se ha obtenido empíricamente como se describió en el apartado 6.2, girando la lente con el emisor enfrentado a ella, manteniendo en todo momento la misma distancia y el mismo ángulo de emisión. Una vez tomados los datos, se ha modelado la lente con diferentes funciones para comprobar cual se ajusta mejor, siendo, como se esperaba, las funciones polinómicas y la función coseno las que mejor se han ajustado. En la figura 7.20 se muestran en azul los puntos medidos, en verde el ajuste de una función polinómica de grado 6, en rojo el ajuste de un polinomio de grado 7 y en negro el ajuste de la función coseno.

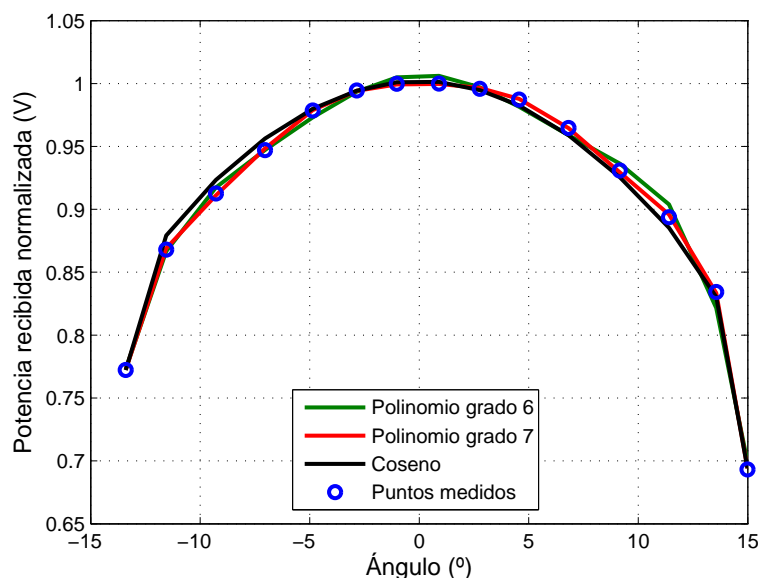


Figura 7.20: Ajuste de los modelos matemáticos de la lente a los puntos medidos

En la tabla 7.6 se muestra el error cuadrático medio y el coeficiente de ajuste para las tres funciones utilizadas. Se puede comprobar que el que mejor se ajusta es el modelo del polinomio de grado 7, pero con valores muy parecidos al del polinomio de grado 6.

Tabla 7.6: RMSE de las funciones utilizadas para modelar el comportamiento de la lente

	Polinomio grado 6	Polinomio grado 7	Función coseno
RMSE	0,008027	0,007749	0,016971
R-Square	0,9957	0,9965	0,9853

En la siguiente prueba se compararán los resultados obtenidos en el posicionamiento 3-D si utilizamos estos métodos. Una vez conocido el modelo de la lente se ha procedido al cálculo de la potencia emitida de uno de los puntos, en caso de la figura 7.21 se ha utilizado el punto 4. Posteriormente se han calculado las posiciones 3-D de los puntos de las dos rectas indicadas anteriormente (una con un alzado y desplazamiento lateral de 4.5 cm respecto a la otra). En la figura 7.21 se muestra en azul los puntos obtenidos utilizando el método anterior (intersección recta con el plano calibrado) que se usará como referencia; en rojo las posiciones obtenidas utilizando el polinomio de grado 6 para modelar la lente, en verde utilizando el polinomio de grado 7 y en morado utilizando la función coseno.

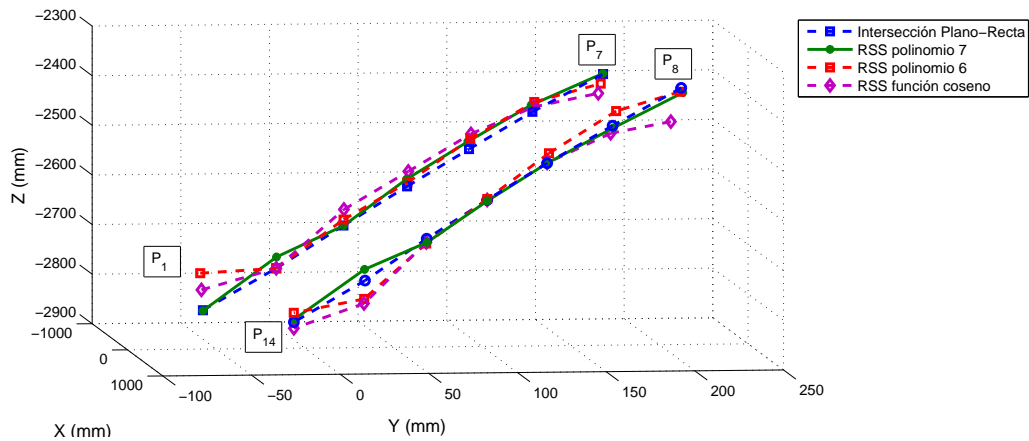
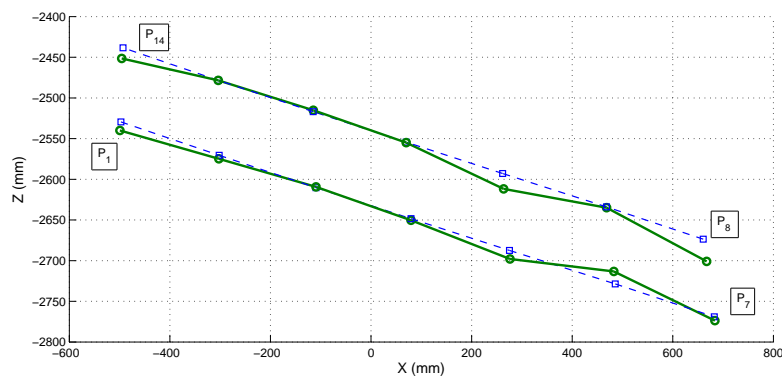
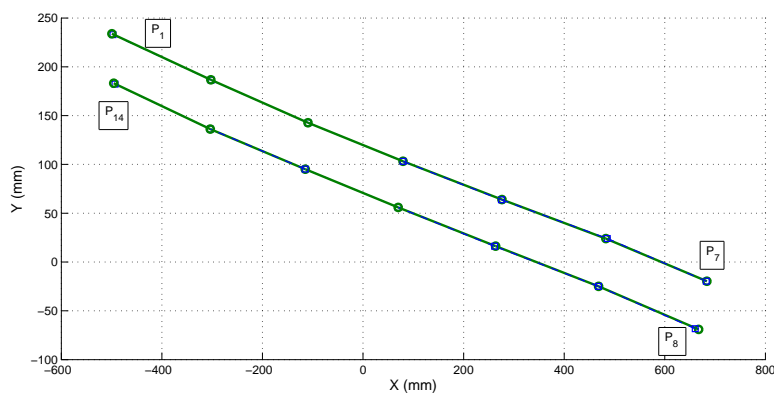


Figura 7.21: Representación de las coordenadas 3D obtenidas de puntos de dos rectas paralelas utilizando diferentes modelos matemáticos para modelar el receptor

Para mostrar mejor los resultados que se pueden obtener mediante el AoA y la potencia estimada, (en comparativa con la intersección plano-recta) en la figura 7.22.a, se muestra una vista lateral donde se perciben las diferencias en el eje z y en la figura 7.22.b una vista para ver la diferencia en los ejes x e y. En estos casos se ha optado por utilizar ya el modelo de lente polinómico de grado 7.



(a)



(b)

Figura 7.22: Representación de las coordenadas 3-D obtenidas mediante AoA y potencia estimada. (a) Vista X-Z; (b) Vista X-Y

Se puede comprobar visualmente que en el cálculo de las coordenadas ( $X, Y$ ), el error absoluto es menor que el que se comete en el eje  $Z$ , así por ejemplo, tomando el punto 8 el error en el eje  $X$  es de 6.7328 mm en términos absolutos, en el eje  $Y$  de 0.7128 mm y en el eje  $Z$  de 27.2493 mm. Sin embargo, en términos relativos el error en el eje  $X$  es de 0.9864 %, en el eje  $Y$  de 1.019 % y en el eje  $Z$  de 0.9841 %, con lo que el error es parecido en todos los ejes e irá en función de la distancia en cada eje.

En la figura 7.23 se muestran los valores de los errores en los ejes  $X, Y$ , y  $Z$  suponiendo como valores ideales los puntos calculados del plano calibrado. Aquí de nuevo se ha optado por presentar los resultados correspondientes al modelo del polinomio grado 7.

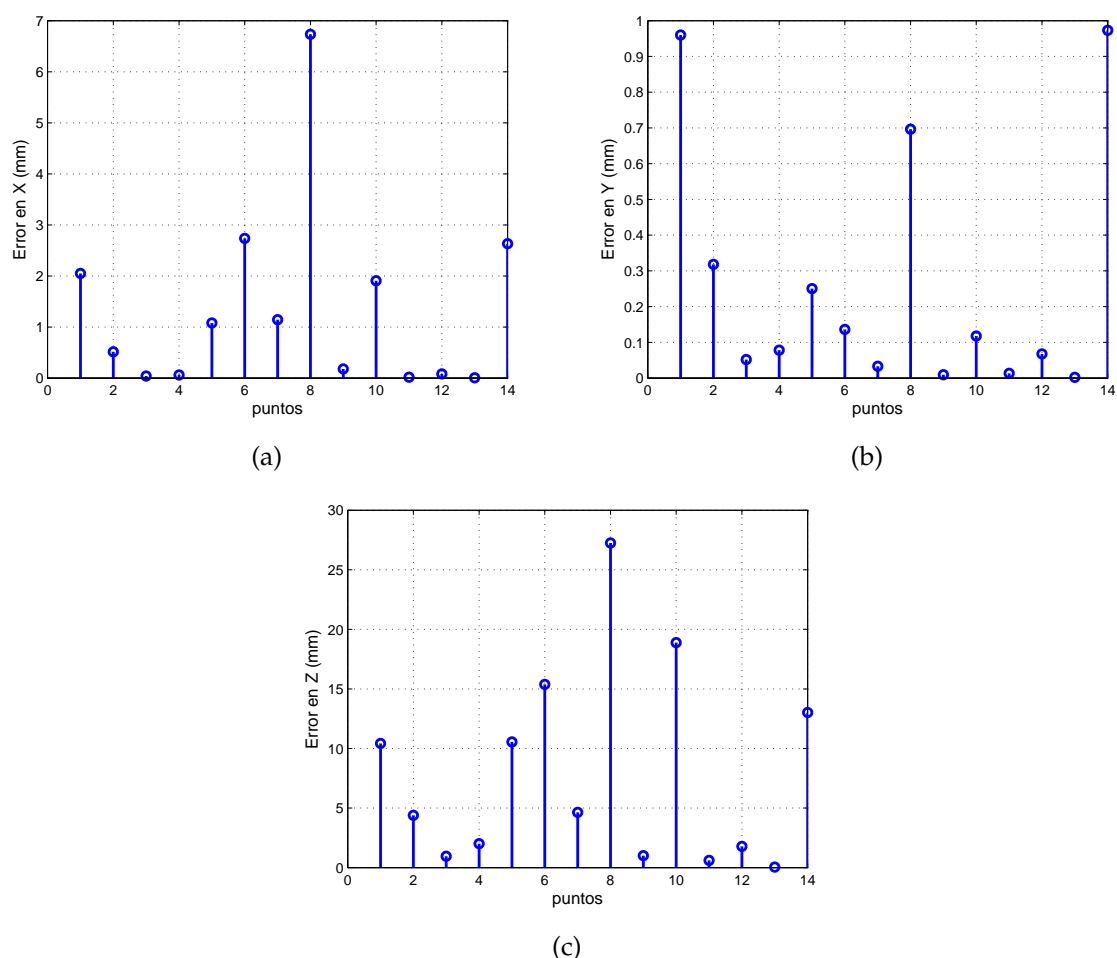


Figura 7.23: Errores cometidos en la determinación de los diferentes puntos y coordenadas; (a) Eje  $X$ ; (b) Eje  $Y$ ; (c) Eje  $Z$

En la figura 7.23 se aprecian cuantitativamente los errores de cada coordenada, siendo en  $Z$  donde se comete un mayor error, además se puede observar que los mayores errores se dan en los puntos de los extremos, debido a que en los extremos es donde peor se ajustan los modelos de la lente. También el error cometido en el ángulo de incidencia es mayor en esa zona; este efecto, aun siendo importante, no lo es tanto como el anterior.

En la tabla 7.7 se muestran los errores máximos, medios y la desviación típica en distancia en cada eje, para los 3 modelos de lente, suponiendo como puntos ideales los puntos obtenidos por el primer método en el que se obtenía la intersección del plano con las rectas.

Tabla 7.7: Errores en las coordenadas  $X$ ,  $Y$ , y  $Z$ , con los diferentes modelos de lentes

Errores (mm)	Eje x			Eje y			Eje z		
	Max	Medio	Std	Max	Medio	Std	Max	Medio	Std
Polinomio grado 7	6,7328	1,37	1,8417	0,9732	0,2648	0,3489	27,2493	7,924	8,3045
Polinomio grado 6	18,7368	3,2499	4,8697	2,1139	0,7221	0,711	75,8329	17,2768	18,5118
Coseno	13,1587	3,7067	4,3381	6,1638	1,0323	1,6633	66,9399	23,7418	20,4346

Como se muestra en la tabla 7.7, el modelo que mejor se comporta ha sido el del polinomio de grado 7. Los mayores errores se producen en la determinación de la altura (coordenada  $Z$ ) y fundamentalmente cuando los puntos se corresponden con ángulos de incidencia grandes. Sin embargo, en términos relativos los errores en los ejes son muy parecidos como se muestra en la tabla 7.8.

Tabla 7.8: Errores relativos en las coordenadas  $X$ ,  $Y$  y  $Z$ , utilizando el polinomio de grado 7 para el modelado de la lente.

Errores (mm)	Eje x			Eje y			Eje z		
	Max	Medio	Std	Max	Medio	Std	Max	Medio	Std
Polinomio grado 7( %)	1,192	0,3025	0,3146	2,478	0,6784	0,6991	0,9876	0,3455	0,3512

De los resultados obtenidos podemos concluir que este método es válido para el posicionamiento 3-D por medio de la potencia recibida y el ángulo de incidencia. Aunque no sea tan preciso como el expuesto en el punto 7.3, tiene la ventaja de que no es necesario calibrar el plano. El hándicap de este método es que tanto la potencia emitida como el receptor deben estar muy bien modelados debido a la gran sensibilidad que presenta ante errores de estos parámetros.

## 7.5 Posicionamiento 3-D a partir de recepción estéreo

Para comprobar los resultados de posicionamiento mediante recepción estéreo utilizando sensores PSD, se ha realizado una prueba que ha consistido en ubicar dos receptores y utilizar una plantilla de calibración, como la que se muestra en la figura 7.24, para obtener las matrices de rotación y traslación entre cada uno de los sensores PSD y dicha plantilla, y a partir de esas matrices obtener la relación entre los receptores (matriz de rotación traslación entre sus referencias de coordenadas).

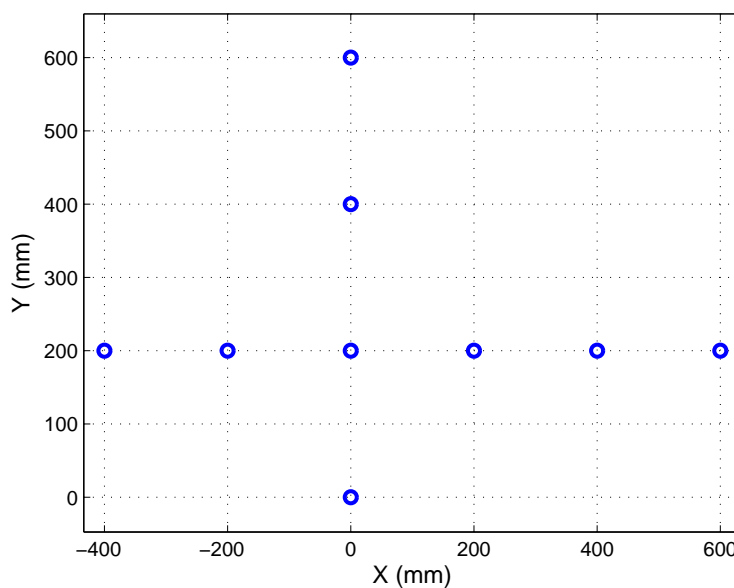


Figura 7.24: Plantilla utilizada para calibración del sistema estéreo

En la figura 7.25.a se muestran los puntos de la plantilla captados en el plano imagen del receptor 1 y en la figura 7.25.b los captados en el plano imagen del receptor 2. Los puntos marcados en rojo son aquellos que son vistos por ambos receptores; los demás puntos son puntos pertenecientes a la plantilla que son captados por un solo receptor, y sirven de ayuda para calcular por separado las matrices de rotación y los vectores de traslación de cada receptor.

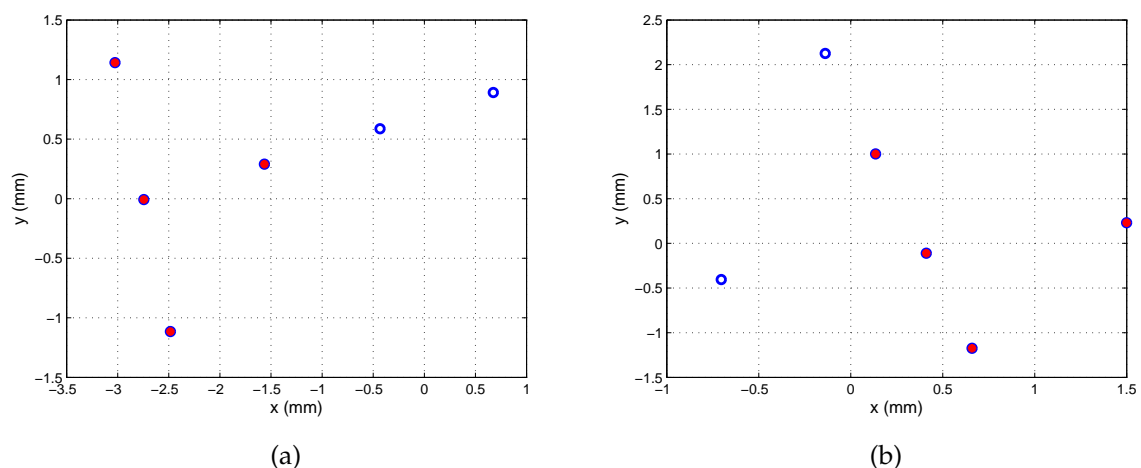


Figura 7.25: Puntos captados en el plano imagen de la plantilla de calibración; (a) Receptor 1; (b) Receptor 2

Las matrices de rotación y traslación obtenidas a partir de (5.28, 5.29, 5.30 y 5.31), para cada receptor han sido:

$$R_1 = \begin{pmatrix} 0,9251 & -0,1978 & 0,3584 \\ -0,2345 & -0,9304 & -0,2584 \\ 0,2987 & -0,3431 & -0,9071 \end{pmatrix} \quad (7.1)$$

$$T_1 = \begin{pmatrix} -472,4139 \\ 201,1276 \\ 2410,3 \end{pmatrix} \quad (7.2)$$

$$R_2 = \begin{pmatrix} 0,9574 & 0,2706 & -0,0769 \\ 0,2592 & -0,8510 & -0,2016 \\ -0,1271 & 0,1746 & 0,9902 \end{pmatrix} \quad (7.3)$$

$$T_2 = \begin{pmatrix} 28,8870 \\ 181,3734 \\ 2688,6 \end{pmatrix} \quad (7.4)$$

donde  $R_1$  y  $R_2$  son las matrices de rotación para los receptores 1 y 2, respectivamente y  $T_1$  y  $T_2$  los vectores traslación para los receptores 1 y 2. Por lo tanto la relación entre el par de receptores es

$$R_{12} = R_1 R_2^{-1} = \begin{pmatrix} 0,9163 & -0,0255 & -0,4279 \\ -0,0111 & 0,9765 & 0,0630 \\ 0,4492 & -0,0680 & 0,8950 \end{pmatrix}$$

$$T_{12} = T_1 - R_{12} T_2 = \begin{pmatrix} 656,1786 \\ -145,0163 \\ 3,3438 \end{pmatrix}$$

Donde  $R_{12}$  es la matriz de rotación y  $T_{12}$  es el vector de traslación entre los receptores. En la figura 7.26 se muestra la posición relativa entre los receptores y la plantilla, donde se remarcan aquellos que se captan desde los dos receptores y aquellos que se captan solamente por uno.



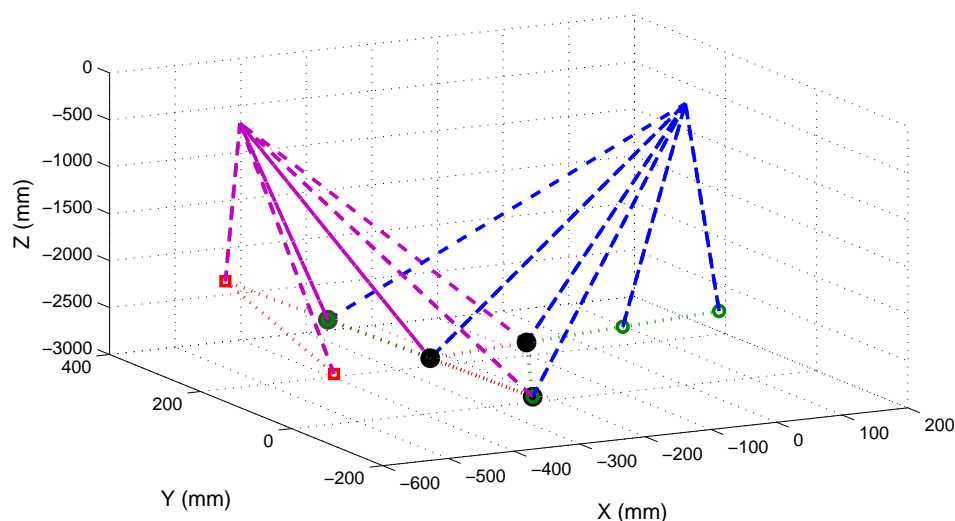


Figura 7.26: Recepción estéreo de la plantilla con referencia en el receptor 1.

Para comparar los resultados obtenidos por medio de la intersección de los ángulos de incidencia, se han utilizado los 4 puntos de la plantilla de calibración comunes a los dos receptores. A partir de los puntos obtenidos en los sensores PSDs se calculan los ángulos de incidencia y se trazan las correspondientes rectas (a partir de la calibración geométrica). Cada uno de los puntos 3-D resultante será aquel donde se crucen las rectas (o aquel que la distancia sea menor a ambas rectas ya que difícilmente se cortarán). A partir del punto obtenido se compara con la posición original del mismo utilizada para el cálculo de las matrices de rotación y traslación.

En la figura 7.27, se muestran los resultados obtenidos del cruce de las rectas entre el receptor 1 y el receptor 2, y en la tabla 7.9 los errores cometidos en la determinación de los cuatro puntos.

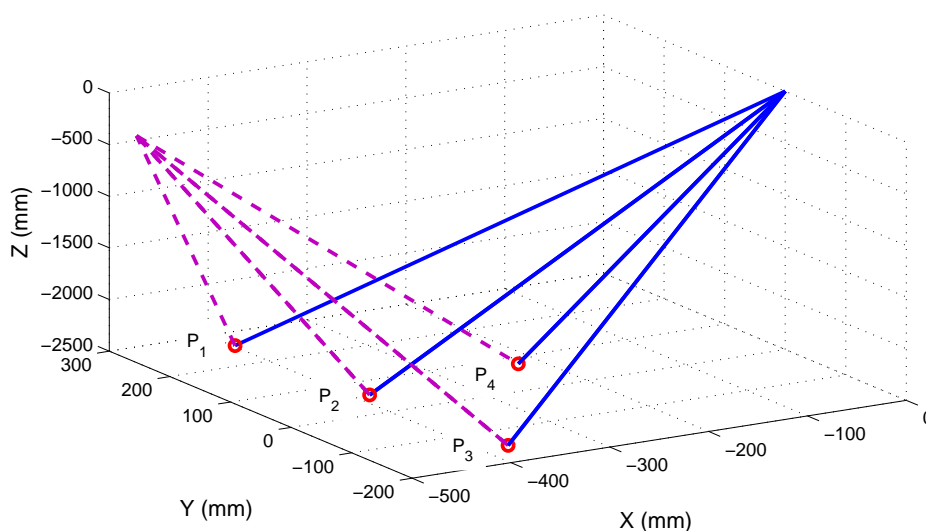


Figura 7.27: Resultados del posicionamiento 3D mediante recepción estéreo

Tabla 7.9: Errores de los puntos calculados por medio de recepción estéreo, siendo los ideales los obtenidos de las matrices de rotación y traslación del receptor de referencia.

	P1	P2	P3	P4
Error en el eje x(mm)	-0,5342	-0,8233	3,4138	4,1343
Error en el eje y(mm)	-0,2647	-1,7723	0,2398	1,2995
Error en el eje z(mm)	-4,9908	-3,2176	-0,2799	12,8168
Error distancia euclidea (mm)	5,0205	3,7646	3,4337	13,5297
Error distancia euclidea (%)	0,2257	0,1572	0,1383	0,5545

Estos resultados en los que los puntos 1, 2 y 3, tienen un error de medio cm o inferior y el error relativo en distancia que se comete, siendo el mayor error de 0.5545 % demuestran la precisión que puede aportar la determinación de puntos 3-D mediante este método, que es sencillo de calibrar y además requiere muy poca carga computacional.

Como consecuencia de lo anterior, y relacionándolo con lo presentado en los puntos 6.3 y 7.5, podría colocarse un sistema estéreo en algún lugar del entorno de paso frecuente de los agentes, determinar la posición 3-D en cualquiera de los puntos de la “zona estéreo” y a partir de esos datos calibrar la potencia del emisor. A partir de ese momento se podría posicionar en zonas con un único sensor PSD por medio de RSS y AoA.

Para terminar, en la figura 7.28 se muestra una comparativa de coordenadas 3-D de varios puntos calculados por diferentes procedimientos. Los presentados en azul corresponden a los puntos obtenidos por medio de la recepción estéreo (solo 4), los verdes por medio de los parámetros extrínsecos y los rojos obtenidos por RSS. En la tabla 7.10 se muestra las distancias entre los puntos obtenidos de RSS, a los puntos obtenidos de la recepción estéreo y a los puntos obtenidos por los parámetros extrínsecos. Aquí vamos a asumir que la coordenada más parecida a la realidad será la obtenida a partir de los parámetros extrínsecos (matrices de rotación traslación obtenidas de esos mismos puntos) y comparamos los resultados con los obtenidos mediante los otros 2 métodos

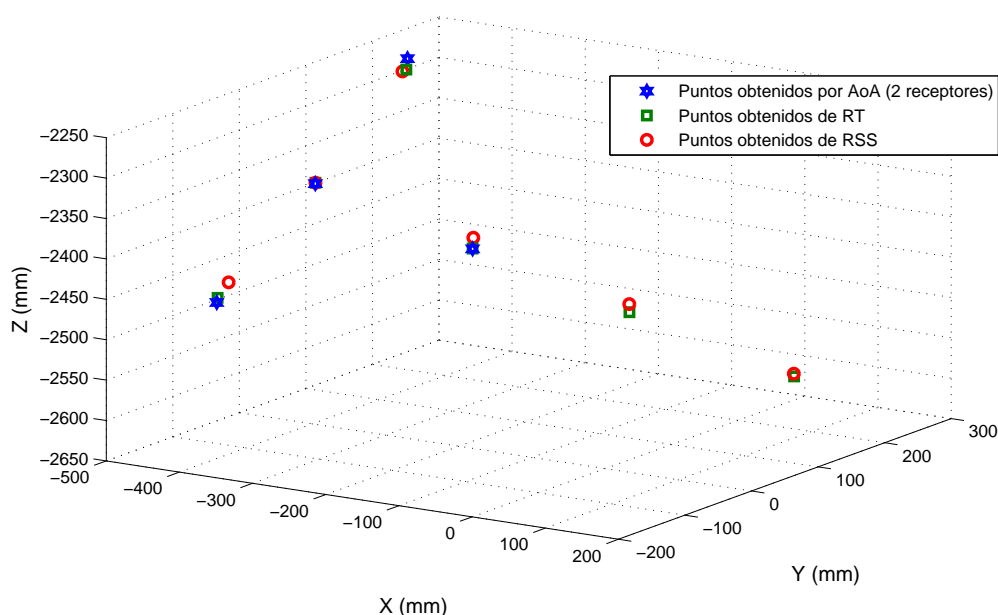


Figura 7.28: Puntos determinados por medio de recepción estéreo (azul), por medio de los parámetros extrínsecos (verde) y por medio de RSS (rojo).

Tabla 7.10: Comparación entre los puntos obtenidos por RSS, estéreo y por medio de la calibración de la plantilla.

	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$
Diferencia Estéreo-RT (mm)	5,0205	3,7646	3,4337	1,3529	—	—
Diferencia Estéreo-RT (%)	0,216	0,1573	0,1386	0,0557	—	—
Diferencia RSS-RT (mm)	8,8044	0,2439	29,8271	18,4201	11,0005	7,2918
Diferencia RSS-RT (%)	0,3787	0,0102	1,2042	0,7584	0,4404	0,2835

De los resultados obtenidos podemos concluir que igual que ocurría en el apartado 7.5, el cálculo de la posición 3-D por medio de RSS tiene más error que calculando la posición por medio de los ángulos de incidencia, aunque como se puede observar los errores en el peor caso es de 29.82 mm. Sin embargo, es un error muy puntual, ya que en los otros 5 puntos el error es muy inferior.

## 7.6 Conclusiones

En este capítulo se han realizado varias pruebas experimentales como: detección e identificación de múltiples agentes, posicionamiento 3-D a partir de la calibración del plano de movimiento, posicionamiento 3-D a partir de RSS y marcas y posicionamiento 3-D a partir de recepción estéreo. Estos métodos de posicionamiento tienen sus ventajas e inconvenientes, y dependiendo de la aplicación para la que se vaya a utilizar, se podrá utilizar uno u otro. De la primera prueba se ha obtenido que se puede realizar la detección e identificación de múltiples agentes con un solo receptor, y con un método sencillo, pero también que se pueden realizar diseñar plantillas de calibración para calibrar el plano o la referencia estéreo de dos receptores, emitiendo todos los puntos de forma simultánea, la calibración del sistema será más sencilla y robusta.

En cuanto a los métodos para la determinación 3-D, se han utilizado como indicador de error las coordenadas 3-D obtenidas por medio de las matrices de rotación y traslación. Estas coordenadas también tendrán errores, ya que, se hace uso de los parámetros intrínsecos obtenidos de la calibración geométrica que también conllevan su error, además de los errores de la plantilla de calibración que también introducen error.

En cuanto al posicionamiento 3-D a partir de la calibración del plano de movimiento, ha mostrado ser un método muy sencillo y preciso con errores por debajo de 2 mm en el caso de comparar las coordenadas 3-D obtenidos de los parámetros extrínsecos con los obtenidos de la intersección plano-recta. También se han realizado dos pruebas más, en las cuales en la primera se conoce las desplazamientos realizados dibujando una recta o como en el caso de la segunda en la que se conoce el radio de la circunferencia trazada. Los resultados de la primera prueba en la que se ha desplazado el agente móvil en pasos de 200 mm hasta los 1200 mm los errores han estado por debajo del 12 mm y en el caso de la circunferencia el error en el radio de la circunferencia ha sido de 3.356 mm, ambos errores indican que este método, en el caso de encontrarnos ante una aplicación en el que el robot móvil se mueve por un plano, sería el adecuado, no solo debido a su precisión, sino también porque solo es necesario conocer el ángulo de incidencia. Por último comentar que los errores obtenidos por este método han sido mejor de los esperados, ya que, como se analizó en el capítulo 6, pequeños errores en los ángulos de incidencia pueden dar errores de varios cm en la determinación de la posición 3-D.

La siguiente prueba (Posicionamiento 3-D a partir de RSS y marcas) consistió en posicionar mediante AoA y RSS; este método ha resultado menos preciso que el anterior con errores de 27.25 mm, siendo el error muy sensible a errores en el modelo de la lente utilizada y de la potencia real emitida, como se comprobó en el capítulo 6. Es un método que permite posicionar a diferentes alturas (3-D) sin necesidad de calibrar el plano y solo necesita como punto de partida una posición conocida (marca) para calibrar la potencia emitida.

Por último se han mostrado los experimentos de posicionamiento 3-D a partir de recepción estéreo. En zonas donde se solapa el FoV de los receptores, se realiza el posicionamiento 3-D por medio de intersección de los AoA de cada punto en los dos receptores del sistema. Los errores son menores de 5 mm, en los puntos analizados en la prueba. Otra aportación interesante de esta alternativa es que en una zona con recepción estéreo se puede calibrar la potencia emitida y en aquellas zonas donde solo haya cobertura de un receptor determinar la posición 3-D mediante AoA y RSS. En esta última prueba se ha calibrado la potencia emitida de un punto obtenido por recepción estéreo y se ha determinado la posición de las otras posiciones, siendo el máximo error menor a 3 cm.

Como se ha demostrado, los métodos descritos anteriormente son método que además son compatibles entre sí, y que dependiendo las necesidades de la aplicación a la cual esté dirigida el sistema será interesante utilizar uno u otro, combinándolo también dan soluciones muy interesantes.

## Capítulo 8

# Conclusiones y trabajos futuros

En este capítulo se recogen las conclusiones más destacadas obtenidas de todo el trabajo realizado a lo largo de la tesis. Además, se presentan varias líneas de investigación futura que surgen de las conclusiones obtenidas. Por último se mostrarán las contribuciones publicadas a fecha de hoy de esta tesis.

### 8.1 Conclusiones

En el capítulo de la introducción se indicó el objetivo principal de esta tesis, así como los objetivos parciales. Estos objetivos estaban orientados a la consecución de la realización de un LPS basado en infrarrojos utilizando únicamente un sensor PSD, el cual debía de ser de coste moderado, con una precisión y cobertura similar a los LPS ya existentes, y baja carga computacional.

El objetivo principal se dividía en varios objetivos específicos, de los que destacan, por las contribuciones obtenidas de los mismos las caracterizaciones y modelos del sistema eléctrico y del sistema geométrico (conjunto sensor PSD y lente) para la medida del ángulo de incidencia. A partir del desarrollo de estos último se ha podido abordar la determinación de la dirección en la cual está ubicado el agente móvil con respecto al receptor (ángulo de incidencia) y la medida de profundidad entre receptor y agente móvil.

La determinación del ángulo de incidencia, presentaba ciertas fuentes de error que dificultaban la medición del ángulo de forma precisa; estas fuentes de error se dividían en dos grupos; las de naturaleza eléctrica y las de naturaleza óptica, descritas todas ellas en el capítulo 3.

En el caso de las fuentes de error de naturaleza eléctrica, provocaban errores en el cálculo del punto de impacto del haz de luz sobre el sensor PSD, y provenían del sensor PSD y el circuito de acondicionamiento y digitalización de las señales. Estas fuentes de error eran debidas a las tolerancias de los componentes involucrados en el

factor de ganancia de las señales, a la temperatura que también afectaba al valor de los componentes, los ruidos del sistema, y la digitalización de las señales.

Así en el capítulo 4, se analizan estas fuentes de error en las que se concluye que existen varios tipos de errores, que se clasifican como errores aleatorios y errores sistemáticos, pudiendo ser estos errores inasumibles, en caso de utilizar componentes de baja calidad. En el caso de los errores sistemáticos, el error producido por las tolerancias es el que predomina pudiendo alcanzar error en el cálculo del punto de impacto 0.237 mm, en el caso de utilizar resistencias y condensadores con tolerancias del 1 % y el 5 % respectivamente, lo que conlleva errores de decenas de cm en la determinación de la posición 3-D del agente móvil. Además este error se propagaría a la obtención de los parámetros intrínsecos del sistema geométrico, lo que haría que el sistema de medida no fuese viable. Para mitigar o eliminar esta fuente de error se propone un modelo y un método de calibración de los factores de ganancia de los diferentes canales del sensor PSD; es un método muy sencillo de llevar a cabo, que no necesita de un equipo sofisticado y como se comprueba en la obtención de los parámetros intrínsecos del sistema visto en el capítulo 5, funciona correctamente.

En lo que se refiere a los errores aleatorios, no se pueden eliminar pero si se pueden mitigar su influencia en el cálculo del punto de impacto, como puede ser escoger componentes de bajo ruido, realizar filtrados tanto analógicos como digitales a las señales, (en caso de ser señales sinusoidales resulta sencillo) y/o aumentar el tiempo de adquisición de las señales. Además el error debido a la digitalización de las señales se reduce escogiendo el ADC que cumpla con ciertos requisitos de número de bits frecuencia de muestreo y SPAN, como se ha deducido y justificado en el capítulo 4.

Las fuentes de error de naturaleza óptica, provienen de la óptica y el sensor PSD. Estas fuentes de error son debidas fundamentalmente a los comportamientos no lineales (las distorsiones) que desvían el haz de luz de forma que su impacto no se produzca en línea con la dirección a la cual está el emisor, falseando así la medida del ángulo de incidencia. En este punto nos encontramos con las distorsiones de la lente, que son de tipo radial y tangencial con el centro de las distorsión en el centro óptico (intersección de la línea perpendicular al sensor PSD que pasa por el centro de la lente) y la del sensor PSD que es tipo radial con centro en el centro geométrico del sensor PSD.

De todas estas distorsiones la del sensor PSD es de aproximadamente el 1 % de su tamaño para un tipo pin-cushion, siendo una distorsión pequeña en comparación con las distorsiones de la lente. Como se ha podido comprobar en las simulaciones del capítulo 5, en las que no se ha tenido en cuenta esta distorsión, el proceso de calibración da buenos resultados. En este punto, se comprueba que los errores sistemáticos de origen eléctricos vistos en el capítulo 4, afectan al cálculo de los parámetros intrínsecos de manera muy notoria.

En las pruebas experimentales realizadas en el capítulo 5, en las que se han calibrado dos tipos de lentes, se muestra claramente, sobretudo en el segundo tipo de lente

(con focal corta) que se realiza satisfactoriamente la corrección de la distorsión; además se validan los resultados de la calibración geométrica en ambos casos, comparando la focal obtenida de la calibración, con la focal medida de una forma alternativa, en la que están involucrados todos los demás parámetros intrínsecos. Las diferencias resultantes son menores de 0.2 mm, en el caso de la primera lente que se corresponde con el 1.278 % de la focal y en la segunda lente errores menores a 0.08 mm que es el 1.068 % de la focal.

Otro objetivo planteado era conseguir que el sistema LPS, fuese capaz de posicionar e identificar varios emisores (agentes) simultáneamente, lo que se ha logrado con un método sencillo que se basa en que cada emisor emita a una frecuencia o secuencia diferente y posteriormente filtrar a cada una de esas frecuencias. Este método tiene la limitación del ancho de banda del sistema. Sin embargo, si se elige otra configuración en la que el detector está en el agente y se disponen en el entorno varios emisores, el sistema podría trabajar con un número indeterminado de agentes.

Por último, en relación el objetivo de la obtención de la profundidad entre emisor y receptor (para posicionamiento 3-D), se han propuesto varios métodos para la determinación de la posición, el primero de ellos se basaba en medidas AoA y en el desplazamiento de los agentes siempre en un mismo plano, para lo que es necesario obtener la ecuación de dicho plano como se explica en el capítulo 6. Este método ha resultado ser un método muy preciso con errores menores a 2 mm que relativo a la distancia entre el receptor y el agente móvil es de 0.0665 %. Este método presenta como desventaja que es necesario conocer el plano por el que se mueve el emisor. Se han realizado pruebas empíricas consistentes en realizar un movimiento en diferentes posiciones de una recta que cruzase todo el FoV del receptor, en incrementos de 20 cm, consiguiendo errores por debajo de los 1.2 cm entre puntos consecutivos (Tabla 7.4). Estos errores se mantienen estables e incluso se reducen entre puntos no consecutivos (Tabla 7.5) es decir, que el error en términos absolutos se mantiene, pero en términos relativos decrece. Otra prueba ha consistido en ocupar posiciones del emisor en un círculo de medio metro de radio, y el objetivo era medir dicho radio con el sensor PSD, el resultado obtenido fue de 496.644 mm (figura 7.18), con lo que se concluye que este método es un método fácil de llevar a cabo, con un procesamiento de señal sencillo y con precisiones por debajo de cm de error.

Otro método, el cual tiene como ventaja, que no es necesario conocer el plano por el que se mueve el emisor, es el posicionamiento mediante RSS y AoA. Con la medida de AoA conocemos la dirección del agente móvil con respecto al receptor, y con RSS se determina la distancia. La medida RSS, depende del modelo de la lente, del patrón de emisión, de la potencia emitida y la distancia. Se ha comprobado, que es muy importante el modelado de la lente, ya que dependiendo el modelo utilizado para ajustar su comportamiento los errores pueden tener diferencias de varios cm, como se ha mostrado en la tabla 7.7 donde el cálculo de la distancia difiere en varias decenas cm entre un modelo y otro. En cuanto al patrón de emisión del LED lo ideal sería que fuese



isótropo, de esa manera el ángulo de emisión no tendría influencia en el cálculo de la distancia. Además, que hay que añadir que es difícil conocer cuál es el ángulo de emisión utilizando únicamente un sensor PSD, por lo que en nuestro caso se ha supuesto que el ángulo de emisión es igual que el ángulo de recepción, algo que sería correcto en caso de que el plano del sensor y el emisor fuesen coplanares, o muy aproximado si la diferencia en grados es pequeña. El LED SFH-4233 que se ha utilizado tiene un patrón lambertiano, esto conlleva un error de 5.5 cm, para una distancia de 4 metros, en el caso de que el ángulo de incidencia sea de  $15^\circ$  y el error del ángulo de emisión  $\pm 5^\circ$  respecto del ángulo de incidencia (figura 6.8). La potencia de emisión depende de la corriente que fluye a través del diodo y de la temperatura, en el caso de que estas variables fluctúen el error en el cálculo de la distancia podría ser importante llegando, por ejemplo, a 7 cm para una distancia de 4 metros, con una diferencia de potencia de emisión del 10 mW, respecto de una nominal de 300 mW, como se muestra en la figura 6.9. Se han realizado dos pruebas en las que se ha hecho uso de este método de posicionamiento; primero partiendo del hecho que se conoce la posición 3-D del agente móvil en un punto, que en nuestro caso al tener caracterizado el plano por el que se mueve, se ha escogido una de esas posiciones y posteriormente se ha ido determinando la posición 3-D del agente móvil utilizando la medida por RSS y AoA, resultando errores en la distancia entre emisor y receptor por debajo de 27.25 mm (Tabla 7.7), lo que equivale al 0.9876 % de la distancia (Tabla 7.8).

La constatación del último método ha consistido en calcular en primera instancia la posición 3-D por medio de recepción estéreo, para así calibrar la potencia emitida y a partir de ese momento y en el caso que el emisor esté dentro del FoV de un solo receptor poder posicionar por medio de RSS y AoA. En este caso los errores en las posiciones en las que el emisor estaba dentro del FoV de los receptores y por tanto el posicionamiento se realizaba por AoA únicamente, el máximo error ha sido de 5.0205 mm en términos absolutos y de 0.216 % (Tabla 7.10) en términos relativos; en el caso en que se posicionaba el agente móvil por medio de RSS y AoA, el máximo error ha sido de 29.8271 mm, 1.2042 % (Tabla 7.10). Con esto se demuestra que realizando el posicionamiento por medio de RSS y AoA los errores son de pocos cm, lo que está en línea con las precisiones obtenidas por otros trabajos de LPS basados en infrarrojos con desarrollos y computo mucho más complejos.

Con esto se puede concluir que los objetivos planteados al inicio de este trabajo, han sido alcanzados de forma satisfactoria, ya que se ha demostrado que con un único sensor PSD, es posible la determinación de la posición 3-D de un agente móvil con buenas precisiones, y por tanto el número de sensores a distribuir por el entorno se puede reducir respecto de los necesarios para otras propuestas y tecnologías, sin que ello repercuta en la precisión y cobertura del sistema. Además, el procesamiento de las señales es casi todos los casos es bajo, excepto en el caso de utilizar la medida PDoA, que si conllevará un procesamiento más elevado, pero que de todas formas está propuesta como una de las líneas de investigación y mejora futuras.

## 8.2 Trabajos futuros

En este apartado se van a proponer varias líneas futuras de investigación, siendo los resultados obtenidos en esta tesis su punto de partida.

- La línea de investigación más inmediata es una iniciada en esta tesis, en la que se propone la determinación de la posición 3-D del agente móvil haciendo uso de la medida por PDoA y RSS. Las áreas de investigación en este caso estarían orientadas al modelado de los osciladores para reducir su efecto en la medida fase, ya que es el principal problema.
- Otro de los trabajos futuros que se plantean es realizar pruebas de medidas de posicionamiento dinámicas; es decir mientras que los agentes están en movimiento. A partir de los resultados se plantearán mejoras en los procedimientos de determinación de la posición incluyendo por ejemplo filtros de Kalman.
- Otra vía que se abre para investigaciones futuras es modificar sensiblemente la configuración del sistema, incluyendo 4 IRED en el agente móvil en lugar de 1. A partir de ahí se deberán desarrollar los modelos y las propuestas, para determinar la posición y orientación a partir de la información recibida; se estima que las precisiones en la determinación de la posición serían muy buenas. En este caso habría que realizar un análisis de la posición entre los LEDs, para optimizar la obtención del posicionamiento 3-D.
- Otra alternativa a investigar más profundamente es la utilización de secuencias a las emisiones, y analizar cómo se interfieren entre ellas cuando el número de las mismas a utilizar es grande. Esta alternativa abre varias vías mediante las que se puede determinar el cálculo del punto de impacto en el sensor PSD.
- Otra línea de investigación, sería utilizar la configuración inversa a la estudiada aquí, colocando el detector en el agente y emisores en el entorno. Aunque se deberá analizar que configuración ofrece más precisión, esta última presenta la ventaja de que el sistema podrían utilizar los LEDs de iluminación existentes para el posicionamiento del agente móvil reduciendo el coste y eliminando la necesidad de tener que colocar dispositivos en el entorno. Además si el sensor PSD tuviese dentro de su FoV 4 LEDs el posicionamiento se podría realizar mediante AoA, con lo que ello conlleva de precisión.
- Una línea muy compleja, pero no que por ello haya que dejar de abordar, consistiría en el desarrollo de alternativas para la mitigación de los multicaminos con señales de baja frecuencia. Esto es debido a que los sensores PSD tienen un ancho de banda muy reducido.

### 8.3 Publicaciones

El desarrollo de esta tesis, además de aportaciones y contribuciones a otros trabajos de investigación y contribuciones conjuntas en congresos y revistas, de forma directa y con contenidos exclusivamente obtenidos de la tesis ha publicado 2 trabajos en revistas de imparto JCR (Q1) que se citan a continuación y tiene otros trabajos en proceso de revisión

- [[Rodríguez-navarro et al., 2016b](#)] Rodríguez-Navarro, D., Lázaro-galilea, J.L., Bravo-muñoz, I., gardel-vicente, A., and Tsirigotis, G. (2016). Analysis and Calibration of Sources of Electronic Error in PSD Sensor Response. *Sensors*, 16(5)
- [[Rodríguez-navarro et al., 2016a](#)] Rodríguez-Navarro, D., Lázaro-galilea, J.L., Bravo-muñoz, I., gardel-vicente, A., Domingo-perez, F., and Tsirigotis, G. (2016). Mathematical Model and Calibration Procedure of a PSD Sensor Ued in Local Positioning System. *Sensors*, 16(9):1-26

# Bibliografía

- [Aguirre et al., 2016] Aguirre, D., Firoozabadi, A. D., Seguel, F., and Soto, I. (2016). underground mining. In *2016 IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA)*, pages 1–6, Curico.
- [Ahmed and Farag, 2005] Ahmed, M. and Farag, A. (2005). Nonmetric calibration of camera lens distortion: Differential methods and robust estimation. *IEEE Transactions on Image Processing*, 14(8):1215–1230.
- [Aitenbichler and Mühlhäuser, 2003] Aitenbichler, E. and Mühlhäuser, M. (2003). An IR Local Positioning System for Smart Items and Devices. *23rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, 2003. Proceedings*, pages 334–339.
- [Aittola et al., 2003] Aittola, M., Ryhänen, T., and Ojala, T. (2003). SmartLibrary - Location-Aware Mobile Library. In *Proceedings of the Fifth International Symposium on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, volume 2795, pages 411–416, Udine, Italy.
- [Álvarez et al., 2017] Álvarez, F. J., Aguilera, T., and López-valcarce, R. (2017). CDMA-based acoustic local positioning system for portable devices with multipath cancellation. *Digital Signal Processing*, 62:38–51.
- [Bahl and Padmanabhan, 2000] Bahl, P. and Padmanabhan, V. N. (2000). RADAR : An In-Building RF-based User Location and Tracking System. *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, 2:775–784.
- [Batista et al., 1998] Batista, J., Araújo, H., and Almeida, A. (1998). Iterative Multi-step Explicit Camera Calibration. In *Sixth International Conference on Computer Vision ICCV98*, volume 15, pages 709–714.
- [Calderoni et al., 2015] Calderoni, L., Ferrara, M., Franco, A., and Maio, D. (2015). Indoor localization in a hospital environment using Random Forest classifiers. *EXPERT SYSTEMS WITH APPLICATIONS*, 42(1):125–134.
- [Chang et al., 2010] Chang, N., Rashidzadeh, R., and Ahmadi, M. (2010). Robust Indoor Positioning using Differential Wi-Fi Access Points. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 56(3):1860–1867.

- [Chrysikos and Kotsopoulos, 2013] Chrysikos, T. and Kotsopoulos, S. (2013). Site-specific Validation of Path Loss Models and Large-scale Fading Characterization for a Complex Urban Propagation Topology at 2.4 GHz. In *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, volume II, pages 4–9, Hong Kong.
- [CS8284, ] CS8284. Available online: <http://www.gage-applied.com/digitizers/GaGe-Digitizer-OctopusCS82XX-PCI-PCIe-Data-Sheet.pdf>.
- [Fan et al., 2008] Fan, W., Zhenshen, Q., Changhong, W., and Bin, H. (2008). Precise Localization of Indoor Mobile Robots in FMS Based on Distributed Vision. In *IEEE international Conference on Automation and Logistics*, number September, pages 2412–2416, Qingdao, China.
- [Faugeras, 1993] Faugeras, O. (1993). *Three dimensional computer vision: A geometric viewpoint*.
- [Fernández et al., 2007] Fernández, I., Mazo, M., Lázaro, J. L., Pizarro, D., Santiso, E., Martín, P., and Losada, C. (2007). Guidance of a mobile robot using an array of static cameras located in the environment. *Autonomous Robots*, 23(4):305–324.
- [Garcia-villalonga and Perez-navarro, 2015] Garcia-villalonga, S. and Perez-navarro, A. (2015). Influence of Human Absorption of Wi-Fi Signal in Indoor Positioning with Wi-Fi Fingerprinting. In *2015 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pages 1–10, Banff, AB.
- [Gorostiza et al., 2011] Gorostiza, E. M., Galilea, J. L. L., Meca, F. J. M., Monzú, D. S., Zapata, F. E., and Puerto, L. P. (2011). Infrared sensor system for mobile-robot positioning in intelligent spaces. *Sensors*, 11(5):5416–5438.
- [Grinter et al., 2002] Grinter, R. E., Aoki, P. M., Hurst, A., Szymanski, M. H., Thornton, J. D., and Woodruff, A. (2002). Revisiting the Visit: Understanding How Technology Can Shape the Museum Visit. In *Conference on Computer Supported Cooperative Work*, pages 146–155, New Orleans, USA.
- [Guo and Xu, 2006] Guo, Y. and Xu, X. (2006). Color Landmark Design for Mobile Robot Localization Yang. In *IMACS Multiconference on Computational Engineering in System Applications”(CESA)*, pages 1868–1874, Beijing, China.
- [Gusenbauer et al., 2010] Gusenbauer, D., Isert, C., and Krösche, J. (2010). Self-Contained Indoor Positioning on Off-The-Shelf Mobile Devices. In *international Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, number September, pages 15–17, Zürich, Switzerland.
- [Ha, 2009] Ha, J.-e. (2009). Automatic detection of chessboard and its applications. *Optical Engineering*, 48(6):1–8.

- [Hamamatsu, ] Hamamatsu. Characteristic and use of PSD. Technical report, Hamamatsu.
- [Hansen et al., 2009] Hansen, R., Wind, R., S. Jensen, C., and Thomsen, B. (2009). Seamless Indoor / Outdoor Positioning Handover for Location-Based Services in Streamspin. In *Tenth International Conference on Mobile Data Management: Systems, Services and Middleware*, pages 267–272.
- [Harter et al., 2002] Harter, A., Hopper, A., Steggles, P., Ward, A., and Webster, P. (2002). The Anatomy of a Context-Aware Application. *Wireless Networks*, 8(2):187–197.
- [Hartley, 1997] Hartley, R. I. (1997). In Defence of the 8-point Algorithm. *Pattern analysis and machine intelligence*, pages 580–593.
- [He and Chan, 2016] He, S. and Chan, S. G. (2016). Wi-Fi Fingerprint-Based Indoor Positioning : Recent Advances and Comparisons. *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, 18(1):466–490.
- [He et al., 2015] He, S., Hu, T., and Chan, S. G. (2015). Contour-based Trilateration for Indoor Fingerprinting Localization Categories and Subject Descriptors. In *Proceedings of the 13th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pages 225–238, New York, nY, USA. ACM.
- [Heikkilä and Silvén, 1997] Heikkilä, J. and Silvén, O. (1997). A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 1106–1112.
- [Hijikata et al., 2009] Hijikata, S., Terabayashi, K., and Umeda, K. (2009). A Simple Indoor Self-Localization System Using Infrared LEDs. In *Sixth International Conference on Networked Sensing Systems (INSS)*, pages 1–7, Pittsburgh, PA.
- [Horikawa et al., 2015] Horikawa, Y., Mizutani, A., Noda, T., and Kikuta, H. (2015). Stereo Camera System with Digital Image Correlation Method for Accurate Measurement of Position and Orientation of Positioning Stage. *International journal of Automation Technology*, 9(4):436–443.
- [Isern Gonzalez, 2003] Isern Gonzalez, J. (2003). *Estudio experimental de métodos de calibración y autocalibración de cámaras*. PhD thesis.
- [Johnson and Lentz, 2003] Johnson, R. and Lentz, C. (2003). 2-D Optical Position Sensor. *Circuit Cellar*, (152):1–7.
- [Jung et al., 2014] Jung, S.-y., Lee, S. R., and Park, C.-s. (2014). Indoor location awareness based on received signal strength ratio and time division multiplexing using light-emitting diode light. *Optical Engineering*, 53(1):1–5.

- [Katsumura, 1989] Katsumura, N. (1989). United States Patent [ 191 Patent Number : Date of Patent :.
- [Kim and Jun, 2008] Kim, J. and Jun, H. (2008). Vision-Based Location Positioning using Augmented Reality for Indoor Navigation. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 54(3):954–962.
- [Koch et al., 2014] Koch, C., Neges, M., König, M., and Abramovici, M. (2014). Automation in Construction Natural markers for augmented reality-based indoor navigation and facility maintenance. *Automation in Construction*, 48:18–30.
- [Kourouthanassis and Roussos, 2003] Kourouthanassis, P. and Roussos, G. (2003). Developing Consumer- Friendly Pervasive Retail Systems. In *IEEE Pervasive Computing*, pages 32–39.
- [Lee et al., 2010] Lee, J.-G., Kim, D.-M., and Suk, J.-Y. (2010). Development of a 3D Position Determination Device using PSD sensor. In *International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*,, pages 1733–1736, Gyeonggi-do, Korea.
- [Liang et al., 2008] Liang, X., Tomizawa, T., Do, H. M., Kim, Y.-s., Ohara, K., Kim, B. K., Tanikawa, T., and Ohba, K. (2008). Multiple Robots Localization Using Large Planar Camera Array For Automated Guided Vehicle System. In *International Conference on Information and Automation*, pages 984–990, Zhangjiajie, China.
- [Liu et al., 2005] Liu, C. H., Jywe, W. Y., Shyu, L. H., and Chen, C. J. (2005). Application of a diffraction grating and position sensitive detectors to the measurement of error motion and angular indexing of an indexing table. *Precision Engineering*, 29(4):440–448.
- [Liu et al., 2007] Liu, H., Darabi, H., Banerjee, P., and Liu, J. (2007). Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems. *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS*, 37(6):1067–1080.
- [Luo et al., 2013] Luo, Y., Shen, Y., Cordero, J., and Zaklit, J. (2013). Enhancing measurement accuracy of position sensitive detector (PSD) systems using the Kalman filter and distortion rectifying. In *2013 IEEE Sensors*, pages 1–4, Baltimore, MD, USA.
- [Makki et al., 2016] Makki, A., Siddig, A., Saad, M., Cavallaro, J. R., and Bleakley, C. J. (2016). Indoor Localization Using 802 . 11 Time Differences of Arrival. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 65(3):614–623.
- [Mandal et al., 2005] Mandal, A., Lopes, C. V., Givargis, T., Haghighat, A., Jurdak, R., and Baldi, P. (2005). Beep : 3D Indoor Positioning Using Audible Sound. In *Second IEEE Consumer Communications and Networking Conference, 2005*, pages 348–353.
- [Marshall et al., 1993] Marshall, A. H., Wolff, S., Purvis, E. J., Park, W., and McCormack, R. T. (1993). Infrared Spot Tracker.

- [Mautz, 2012] Mautz, R. (2012). *Indoor Positioning Technologies*. PhD thesis, ETH Zurich.
- [Mazuelas et al., 2009] Mazuelas, S., Bahillo, A., Lorenzo, R. M., Fernandez, P., Lago, F. A., Garcia, E., Blas, J., and Abril, E. J. (2009). Robust Indoor Positioning Provided by Real-Time RSSI Values in Unmodified WLAN Networks. *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN SIGNAL PROCESSING*, 3(5):821–831.
- [Medina et al., 2013] Medina, C., Segura, J. C., and De la Torre, Á. (2013). Ultrasound Indoor Positioning System Based on a Low-Power Wireless Sensor Network Providing Sub-Centimeter Accuracy. *Sensors*, 13(3):3501–3526.
- [Nadeem et al., 2014] Nadeem, U., Hassan, N. U., Pasha, M. A., and Yuen, C. (2014). Highly accurate 3D wireless indoor positioning system using white LED lights. *Electronics Letters*, 50(11):828–830.
- [New, 1974] New, B. M. (1974). Versatile Electrooptic Alignment System for Field Applications. *Applied optics*, 13(4):937–941.
- [Nieves et al., 2013] Nieves, E., Xi, N., Jia, Y., Martinez, C., and Zhang, G. (2013). Development of a Position Sensitive Device and Control Method for Automated Robot Calibration. In *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, pages 1127–1132, Madison, WI.
- [Niu et al., 2013] Niu, J., Lu, B., Cheng, L., Gu, Y., and Shu, L. (2013). ZiLoc : Energy Efficient WiFi Fingerprint-based Localization with Low-Power Radio. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 4558–4563, Shanghai.
- [OPA, ] OPA. Available online: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa4820.pdf>.
- [Ouellette et al., 2007] Ouellette, R., Hirasawa, K., and Overview, A. (2007). A Comparison of SLAM Implementations for Indoor Mobile Robots. In *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 1479–1484, San Diego, CA, USA.
- [Park et al., 2006] Park, J.-h., Won, D.-h., and Park, K.-y. (2006). Development of a Real Time Locating System Using PSD under Indoor Environments. In *SICE-ICASE International joint Conference 2006*, pages 4251–4255, Bexco, Korea.
- [Pizarro et al., 2009] Pizarro, D., Mazo, M., Santiso, E., Marron, M., and Fernandez, I. (2009). Localization and Geometric Reconstruction of Mobile Robots Using a Camera Ring. *IEEE transaction on instrumentation and measurement*, 58(8):2396–2409.
- [Priyantha et al., 2000] Priyantha, N. B., Chakraborty, A., and Balakrishnan, H. (2000). The Cricket Location-Support System. In *6th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking*, number August, Boston, MA.
- [PSD S5991-01, ] PSD S5991-01. Available online: [http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s5990-01\\_etc\\_kpsd1010e.pdf](http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s5990-01_etc_kpsd1010e.pdf).



- [Rashidi and Mihailidis, 2013] Rashidi, P. and Mihailidis, A. (2013). A Survey on Ambient-Assisted Living Tools for Older Adults. *IEEE journal of biomedical and health informatics*, 17(3):579–590.
- [Renner, 2009] Renner, E. (2009). *Pinhole photography, from historic technique to digital application*. 4 edition edition.
- [Rodríguez-navarro et al., 2016a] Rodríguez-navarro, D., Lázaro-galilea, J. L., Bravo-muñoz, I., Gardel-vicente, A., Domingo-perez, F., and Tsirigotis, G. (2016a). Mathematical Model and Calibration Procedure of a PSD Sensor Used in Local Positioning Systems. *Sensors*, 16(9):1–26.
- [Rodríguez-navarro et al., 2016b] Rodríguez-navarro, D., Lázaro-galilea, J. L., Bravo-muñoz, I., Gardel-vicente, A., and Tsirigotis, G. (2016b). Analysis and Calibration of Sources of Electronic Error in PSD Sensor Response. *Sensors*, 16(5).
- [Rostkowska and Topolski, 2015] Rostkowska, M. and Topolski, M. (2015). On the Application of QR Codes for Robust Self-localization of Mobile Robots in Various Application Scenarios. *Progress in Automation, Robotics and Measuring Techniques. Advances in intelligent Systems and Computing*, 351:243–252.
- [Röwekämper et al., 2012] Röwekämper, J., Sprunk, C., Tipaldi, G. D., Stachniss, C., Pfaff, P., and Burgard, W. (2012). On the Position Accuracy of Mobile Robot Localization based on Particle Filters Combined with Scan Matching. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 3158–3164, Vilamoura.
- [Salido-monzú et al., 2014] Salido-monzú, D., Martín-gorostiza, E., Lázaro-galilea, J. L., Martos-naya, E., and Wieser, A. (2014). Delay Tracking of Spread-Spectrum Signals for Indoor Optical Ranging. *Sensors*, pages 23176–23204.
- [Salomon et al., 2006] Salomon, R., Schneider, M., and Wehden, D. (2006). Low-cost optical indoor localization system for mobile objects without image processing. In *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA*, pages 629–632, Prague.
- [Sasaki and Hashimoto, 2007] Sasaki, T. and Hashimoto, H. (2007). Acting in intelligent space - mobile robot control based on sensors distributed in space -. In *IEEE/AS-ME international conference on advanced intelligent mechatronics*, pages 1–6.
- [SFH-4233, ] SFH-4233. Available online: [http://www.osram-os.com/Graphics/XPic0/00093422\\_0.pdf](http://www.osram-os.com/Graphics/XPic0/00093422_0.pdf).
- [Sorour et al., 2015] Sorour, S., Lostanlen, Y., and Valaee, S. (2015). Joint Indoor Localization and Radio Map Construction with Limited Deployment Load. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 14(5):1031–1043.

- [Sutherland, 1974] Sutherland, I. E. (1974). Three-dimensional data input by tablet. In *Proceedings of the IEEE*, volume 62, pages 453–461.
- [Trevisani and Vitaletti, 2004] Trevisani, E. and Vitaletti, A. (2004). Cell-ID location technique, limits and benefits: an experimental stud . In *Sixth IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, pages 51–60.
- [Trulls et al., 2011] Trulls, E., Corominas Murtra, A., Pérez-Ibarz, J., Ferrer, G., Vasquez, D., Mirats-Tur, J. M., and Sanfeliu, A. (2011). Autonomous navigation for mobile service robots in urban pedestrian environments. *Journal of Field Robotics*, 28(3):329–354.
- [Tsai, 1987] Tsai, R. Y. (1987). A Versatile Camera Calibration Techniaue for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-shelf TV Cameras and Lenses. *IEEE Journal of robotics and automation*, 3(4):323–344.
- [Wang et al., 2012] Wang, C., Chen, W., and Tomizuka, M. (2012). Robot End-effector Sensing with Position Sensitive Detector and Inertial Sensors. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 5252–5257, RiverCentre, Saint Pul, Minnesota, USA.
- [Want et al., 1992] Want, R., Hopper, A., Falcao, V., and Gibbons, J. (1992). The Active Badge Location System. In *ACM Trans. Inf. Syst.*, volume 10, pages 91–102, New York, NY, USA.
- [Wiesner et al., 2017] Wiesner, S. A., Thoben, K.-d., Wiesner, S., and Wuest, T. (2017). "Industrie 4 . 0 " and Smart Manufacturing - A Review of Research Issues and Application Examples. *International journal of Automation Technology*, 11(1):4–16.
- [Zhang, 2000] Zhang, Z. (2000). A Flexible New Technique for Camera Calibration. Technical Report 11.
- [Zhou et al., 2009] Zhou, Y. G., Xie, Y. G., Dan, Z., and Yu, G. P. (2009). Research of 3D spatial localizing system based on PSD sensor. In *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, ICMTMA*, volume 1, pages 55–58, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.

